

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
Departamento de Física



Sistema de caracterização de uma suspensão supercondutora

António Filipe Pinto de Almeida Amorim

Mestrado Integrado em Engenharia Física

Dissertação orientada por:
Dr. Paulo Gordo

2017

Dedicatória e Agradecimentos

É com grande consideração e respeito que mostro a minha gratidão pelo esforço do meu orientador, Dr. Paulo Gordo, que foi responsável pelo projeto e ambiente onde me integrou. O tempo que despendeu na minha orientação constituiu um custo elevado à celeridade do projeto e um fardo adicional às suas funções. Ainda assim, ele prontamente me aceitou orientar e levou a cabo essa campanha de suporte e orientação durante todo o extenso período desta etapa da minha vida.

Eu gostaria de dedicar este documento aos meus pais pelo esforço resiliente e continuado de 24 anos a educar-me, alimentar-me, entre tantos outros. Fazendo as contas, pelo esforço financeiro apenas, eles poderiam facilmente ter comprado uma casa em vez de me criarem. O valor do que o que eles fizeram por mim é inestimável, incalculável e, sem dúvida, a base fulcral de toda a minha vida, presente, passada e futura.

Juntamente com as minhas irmãs, que me acompanharam sempre e sempre acompanharão, a família ergueu um ambiente perfeito para a minha infância e formação como pessoa. Foram elas também uma base insubstituível na determinação de quem eu viria a ser.

Se a minha família promoveu uma vida distante de dificuldades e cheia de alegria e companhia, os meus amigos revelaram-se uma força inegável no apoio e parceria durante tantos anos. Constatado repetidamente que superam qualquer expectativa na fraternidade com que me tratam e na inclusão que me oferecem nas suas vidas. Um grupo de amigos como o meu não é de todo comum, e a nossa proximidade é digna de uma série de Hollywood.

Se os meus amigos me acompanharam, puxaram e carregaram durante todo o processo da minha formação e em especial me suportaram na peregrinação que foi para mim este curso, os colegas de faculdade fizeram da peregrinação não mais do que passeio no parque. Pela aura de amizade e camaradagem que me proporcionaram nos momentos mais desafiantes por que passámos, estou-lhes imensamente grato.

Por fim, é meu grande prazer agradecer ao povo português e ao estado que ele mantém por me providenciarem uma educação ao mais alto nível concebível, dando-me a maior das oportunidades na valorização e elevação da minha pessoa. Se aqui cheguei, foi graças ao desígnio conjunto de um povo, que deliberou que fosse um direito inegável o meu acesso à educação, garantindo a minha libertação da obscuridão da ignorância. Ó nobre povo, nação valente, sente-se a tua voz.

Resumo

Neste documento faz-se prova do trabalho que produzi no decorrer da minha tese de mestrado, adicionado de uma dissertação sobre a teoria e informação que foi necessária à mesma. O trabalho foi efetuado no âmbito do projeto ESA, LEVISOLATOR, no qual tive a oportunidade de participar e obter experiência em variadas áreas tecnológicas.

Neste mesmo documento faço uma introdução ao projeto, às minhas funções e responsabilidades no mesmo e à teoria subjacente. De seguida é proporcionado uma visão sobre todos os subsistemas, as suas finalidades, teoria de operação e a montagem efetuada. Por fim, são apresentados os resultados da experiência, a sua análise e uma minuciosa avaliação de todos os pontos relativos ao projeto e a minha participação no mesmo.

Palavras chave

Criogenia, Suspensão magnética, Teste em vácuo, Forçamento magnético, Controlo de *Voice-coil*

Abstract

In this document, I present proof of the work I did on my master's thesis. To this is appended an insight on the theory and information that was required throughout. The tasks that I've undertaken were part of an ESA project, LEVISOLATOR, in which I had the opportunity of participating and in which I've obtained experience in a much-varied technical range.

In this record, you can find an introduction to both the project and my part in it, as well as the theory that lies underneath. A broad review on all subsystems is provided, on their purpose, operation and our take on it.

At last, the results obtained are reported and a dissertation is made on the project developed and my participation on it.

Keywords

Cryogenics, Magnetic Suspension, Vacuum testing, Magnetic excitation, Voice-coil control.

Índice

Dedicatória e Agradecimentos.....	II
Resumo	III
Palavras chave	III
Abstract.....	III
Keywords.....	III
Índice	IV
Lista de quadros.....	VI
Lista de Figuras.....	VI
Lista de Abreviaturas, siglas e símbolos.....	VIII
Estrutura da Dissertação	XI
1 Introdução e contexto	2
1.1 O projeto.....	2
1.2 Solução proposta	3
1.3 Participação do grupo CENTRA-SIM (FCUL).....	3
1.4 A minha participação.....	4
2 Introdução teórica.....	6
2.1 Teoria de suspensões	6
2.1.1 Vibrações com um grau de liberdade	6
2.1.2 Vibração unidimensional não amortecida	6
2.1.3 Vibração unidimensional amortecida	7
2.1.4 Oscilação forçada de um sistema unidimensional	9
2.1.5 Teoria de suspensões lineares com parâmetros constantes, para um grau de liberdade.....	12
2.2 Suspensões magnéticas.....	16
2.3 Suspensões supercondutoras	17
2.3.1 Um supercondutor: efeitos e consequências.....	17
2.3.2 Interação de um supercondutor com um campo magnético	18
3 O design proposto.....	19
3.1 ISOLATOR, tipo de suspensão, metas e requerimentos do projeto	19
3.1.1 A suspensão.....	21
3.1.2 Funcionamento e características esperadas	22
3.1.3 Resultados dos testes feitos em Espanha e conclusões.....	23
3.2 Sistema de teste e caracterização.....	27
3.2.1 Definição dos testes.....	28
3.2.2 Critérios de aprovação.....	28

3.2.3	Requisitos de Pressão e temperatura	29
3.2.4	Requisitos de dinâmica.....	30
4	Desenvolvimento do sistema de teste.....	32
4.1	Conceito final	32
4.2	Conceito para a 1ªfase	32
4.2.1	Esquemas.....	33
4.2.2	Estrutura hexapod.....	34
4.2.3	Estrutura utilizada.....	36
4.3	Sistema de Vácuo	37
4.4	Sistema de Criogenia.....	41
4.4.1	Cryocooler Gifford-McMahon	41
4.4.2	Sensores.....	44
4.4.3	Escudo de radiação e tranças.....	44
4.4.4	Simulações e resultados.....	46
4.5	Sistema de forçamento	48
4.5.1	Atuadores para o forçamento.....	48
4.5.2	Sensores de força.....	50
4.5.3	Sensores de posição.....	51
4.5.4	Controlo.....	52
4.6	Sistema de Posicionamento tridimensional (HDRM)	59
4.6.1	Requisitos do sistema	59
4.6.2	Solução proposta, problemas e correção	59
4.6.3	Sensores PSD	59
4.6.4	Teste de estimação de performance.....	60
4.6.5	Design Finalizado.....	62
5	Resultados e Análise	64
5.1	Testes estáticos	65
5.1.1	Resultados dos testes estáticos	67
5.2	Testes dinâmicos	67
5.2.1	Modelo e resultados esperados	68
5.2.2	Cálculo da SFD pela FFT	69
5.2.3	Valores medidos e cálculos	72
5.2.4	Fontes de erro e incerteza.....	76
5.3	Análise de resultados.....	78
6	Conclusões	79
7	Referências	80

8	Anexos.....	82
A.	Características de materiais para baixas temperaturas	82
B.	Datasheets de alguns dos instrumentos utilizados	84

Lista de quadros

Tabela 3-1	Valores mínimos de aceitabilidade dos parâmetros da suspensão.....	28
Tabela 3-2-	Tabela das condições impostas ao desenho da experiência de teste da suspensão supercondutora.	31
Tabela 4-1	Tabela das tecnologias ponderadas para o forçamento da suspensão, para efeitos de caracterização da mesma.	49
Tabela 4-2-	Tabela das tecnologias ponderadas para a medição da posição relativa entre os componentes da suspensão.	51
Tabela 5-1	– in BBT test report. Tabela dos resultados obtidos pelos testes estáticos.	67

Lista de Figuras

Figura 2.1-	Dependência, em frequência, da amplitude(normalizada) e do desfasamento da oscilação da massa relativamente à força excitadora, para vários valores do coeficiente de amortecimento (x). 11
Figura 2.2	Esquema ilustrativo do modelo de um sistema passivo de isolamento de vibração..... 13
Figura 2.3-	Razão entre as amplitudes de oscilação da massa suspensa (relativamente à base) e a da base em função da frequência, para vários valores de amortecimento..... 14
Figura 2.4	– Módulo da transmissibilidade em função da frequência normalizada para vários valores do coeficiente de amortecimento..... 15
Figura 3.1	– Modelo computacional cortado da proposta de sistema de suspensão. As setas identificam o eixo central de ÍP que irá deslocar-se no interior do cilindro composto dos SC, também identificado. 22
Figura 3.2	-Fotografia da primeira experiência construída na MAGSOAR S.L. A vermelho destaca-se o distanciômetro laser e ao lado pode-se ver a torre de massas utilizadas para o forçamento 23
Figura 3.3	– Estrutura da experiência final..... 24
Figura 3.4	– gráfico típico dos resultados das medições efetuadas com a primeira montagem. 25
Figura 3.5	– Curvas de Força em função do deslocamento. 26
Figura 3.6	– “torre” de ISOVAL, rigidez elevada com baixa condução térmica..... 30
Figura 4.1	Esquema ilustrativo do sistema de caracterização da suspensão supercondutora. 33
Figura 4.2	Modelo computacional da primeira proposta de estrutura para o equipamento de testes. 34
Figura 4.3	simulação térmica da estrutura por elementos finitos através do software SOLIDWORKS tm 35
Figura 4.4	Resultados da simulação de contração utilizando os dados de temperatura provenientes da simulação apresentada na Figura 4.3, relativos à contração térmica..... 35
Figura 4.5	Fotografia da montagem experimental numa fase avançada. 36
Figura 4.6	Esquema ilustrativo do funcionamento de uma bomba rotatória. 38
Figura 4.7	– corte de uma bomba turbomolecular. 39
Figura 4.8	- gráfico de temperatura vs. entropia para um ciclo de Gifford-McMahon..... 42
Figura 4.9	– Representação gráfica do ciclo mecânico de funcionamento de um expensor de ciclo Gifford-McMahon. 43

Figura 4.10 – modelo tridimensional do mecanismo de contacto térmico da cabeça do dedo-frio e o SC.....	45
Figura 4.11 resultado das simulações de tempos de arrefecimento de um sólido de alumínio ou aço inoxidável, desde os 300K até aos 15K.....	46
Figura 4.12 resultados da simulação de elementos finitos das torres das estruturas.....	47
Figura 4.13 – Esquema representativo do funcionamento de uma H-Bridge.	54
Figura 4.14 – amplificador de isolamento. Esquema do circuito elétrico que utilizámos para adaptar os sinais dos sensores para os CAD do BeagleBone sem ter problemas como modo-comum.	56
Figura 4.15 – fotografia do circuito de adaptação de sinal já implementado	57
Figura 4.16 – Esquema do circuito elétrico utilizado para isolar a parte digital do BeagleBone do controlador da voice-coil.....	57
Figura 4.17 – fotografia da implementação do isolamento ótico do controlador da voice-coil.....	58
Figura 4.18- Diagrama ilustrativo do paradigma de processamento dos sinais dos detetores PSD....	60
Figura 4.19 – Circuito de transimpedância utilizado na utilização dos sensores PSD.	60
Figura 4.20 - Esquema ilustrativo da experiência de estimação da performance do sistema de deteção com sensores PSD e a eletrónica aplicada.....	61
Figura 4.21 – gráfico dos pontos medidos e dos valores obtidos pela regressão linear.....	62
Figura 4.22 – erros relativos à reta da regressão linear.....	62
Figura 4.23 - Sistema de medição de posição.....	63
Figura 5.1 – Fotografia do núcleo da experiência desenvolvida.....	64
Figura 5.2 – gráfico de uma das medidas de rigidez estática efetuada.	65
Figura 5.3 – Gráficos dos valores medidos num teste de estabilidade temporal (77K).....	66
Figura 5.4 – Esquema do modelo matemático utilizado.	68
Figura 5.5 – gráficos dos valores medidos para 1 Hz, num dos testes dinâmicos.	71
Figura 5.6 – gráficos da relação entre a amplitude de oscilação e amplitude da força para diferentes frequências.	72
Figura 5.7 – gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados através da massa e coeficiente de rigidez.....	74
Figura 5.8 – comparação entre os valores medidos e resultantes do modelo do oscilador harmónico, tendo como base a frequência de pico e a amplitude a esta frequência.....	75
Figura 5.9 – comparação entre um gráfico em que o modelo se apresenta com uma resolução de 1 Hz e um em que o modelo é aplicado aos pontos medidos.....	77
Figura 8.1 e 8.2 - Gráficos obtidos da implementação em Excel dos coeficientes provenientes do estudo do NIST para características de materiais a baixas temperaturas.....	83
Figura 8.3- Curvas para o coeficiente de expansão térmica a baixas temperaturas. Curvas para o .coeficiente de expansão térmica a baixas temperaturas.	83

Lista de Abreviaturas, siglas e símbolos

@ - símbolo at, corresponde a atribuir uma característica ou local (@100Hz, que funciona a 100Hz)

ArduinoTM- Marca registada que comercializa microcontroladores de fácil utilização

ATHENA – **A**dvanced **T**elescope for **H**igh **E**nergy **A**strophysics

BBT- bread-board-testing, testes iniciais em laboratório ao funcionamento da tecnologia

BeagleBoneTM- Marca registada de microprocessadores/microcontroladores de elevada capacidade computacional (dentro do ramo dos microcontroladores amadores)

Beam-splitter- Objeto de natureza ótica com o intuito de dividir um feixe em dois.

Binning- Operação estatística de quantificação da informação em conjuntos com uma grandeza semelhante, representados por um valor comum para cada conjunto.

Cc- Amortecimento crítico, valor do coeficiente de amortecimento para o qual o sistema vibração deixa de produzir oscilações.

Centra-sim - **C**entro **M**ultidisciplinar para a **A**strofísica - **S**cientific and **S**pace **I**nstrumentation and **M**odelling

cold-cathode gage- sensor de vácuo que passa pela ejeção de eletrões de um cátodo através de campos elétricos e não através de aquecimento.

Cryocooler – sistema de arrefecimento a temperaturas criogénicas

Debug- acto de corrigir erros e defeitos.

Design – Conceção, aos mais variados níveis intelectuais, de um objeto. Do conceito filosófico e representação gráfica ao desenho técnico e planeamento de produção.

ESA – **E**uropean **S**pace **A**gency

ξ – Símbolo utilizado para a razão entre o coeficiente de amortecimento e o valor do amortecimento crítico

ϕ (α grau)- desfazamento entre o forçamento e a oscilação da massa suspensa.

FFT –**F**ast **F**ourier **T**ransform, método expedito de cálculo da série de Fourier discreta de séries de valores reais.

floating point operations – Operações de circuitos digitais que operam sobre representações digitais de valores não binários.

flux creep – Efeito de perda de repulsão magnética por parte de um supercondutor ao longo do tempo.

flux pinning – Efeito da concertação dos vórtices de pares de Cooper em supercondutores de tipo 2 em certos pontos da matriz cristalina e em número fixo. Provoca a levitação estável de supercondutores sobre ímanes.

FPA- Focal Plan Array, Série de objetos sensíveis que se encontram no plano focal do sistema ótico e que permitem a captação da imagem. A definição pode estender-se aos dispositivos envolvidos no processo que estejam solidários com o detetor.

GM – Gifford McMahon, Nome do cientista cuja invenção do ciclo do mesmo nome é atribuída. Os aparelhos que utilizam este ciclo são denominados de cryocoolers de Gifford McMahon.

H-bridge – Circuito eletrónico que permite alternar e controlar a direção das conexões elétricas aplicadas a outro dispositivo. Circuito muito utilizado no controlo de motores elétricos por sinais digitais.

HDRM- Hold Down Release Mechanism, Aparelho necessário para o posicionamento do objeto a levitar numa suspensão supercondutora. A posição do objeto aquando da transição supercondutora define, em parte, a posição de equilíbrio da suspensão.

Hexapod- suporte de seis braços que, promovendo forças linearmente independentes, permite fixar por completo um objeto. A palavra portuguesa comumente aplicada é a de treliça.

Im()- Função que retorna a parte imaginária de um número complexo.

ÍP – Íman Permanente

Kernel – Conjunto de funcionalidades essenciais de base para a manutenção e operação de um sistema operativo.

Kevlar™- Marca registada de um material de utilização comum (Poly-paraphenylene terephthalamide). As fibras de Kevlar apresentam características de rigidez e resistência mecânica muito superiores á grande maioria dos materiais praticáveis. Fibra desenvolvida e utilizada para a tela de reforço dos pneus automóveis.

Levisolator - Levitation Isolator, Nome dado ao projecto ESA discutido nesta dissertação.

load-cell – Transdutor de força em sinal eléctrico mensurável.

m – símbolo utilizado no decorrer da dissertação na identificação da massa inercial do objecto a ser suspenso.

M (α) –Fator de ampliação , Módulo da função de transmissão.

MLI – Multi Layer Insulation, Composto de folhas de alumínio e rede isolante sobrepostas sequencialmente que providencia um escudo de radiação eficiente, deformável, leve, entre outros.

off-the-shelf - Produto que se encontra já em comercialização e que não foi, portanto, encomendado nem especificado para um fim único.

PID – Proportional Integral Derivative, família de controladores que se baseiam no valor instantâneo da sinal de erro, assim como do sua derivada e integral temporal, para calcular o valor do sinal de controlo.

PRU – Programmable Real-time Unit, componente eletrónica de alguns microcontroladores recentes que permite uma linha de processamento única e dedicada ao sinal de algumas entradas e saídas.

PSD – **P**osition **S**ensitive **D**evice, sensor smicondutor que permite identificar a posição da média aritmética espacial da intensidade de um feixe que nele incide.

PWM – **P**ulse **W**idth **M**odulaiton. Mecanismo eltrónico/elétrico de comunicação e controlo através da modulação da proporção de tempo em que um sinal binário se encontra em estado 0 ou em estado 1 num período fixo. Permite controlar diretamente motores através de uma H-bridge.

$r(\beta)$ – Frequência normalizada á frequência natural de oscilação de um sistema.

$\text{Re}()$ – Função que retorna o valor real de um número complexo.

sc – supercondutor.

settling time – Tempo que um sistema demora até se estabilizar após uma transição abrupta de estado.

SFD – **S**érie de **F**ourier **D**iscreta, série de Fourier para sucessões de valores (ao invés de funções contínuas).

SMS- **S**uperconducting **M**agnetic **S**uspension

strain gage - tipo de load-cell que se baseia na medição da deformação elástica de um metal rígido por uma força, através da variação da resistência elétrica de um filamento quando este é estendido.

T – Função de transmissão, proporção da força que é aplicada num lado de uma suspensão que é transmitida à massa suspensa (ou proporção entre amplitudes de oscilação).

TES – **T**ransition **E**dge **D**etector, Bolómetro que permite a detecção de feixes de partículas microscópicas e suas energias através da sensibilidade da transição supercondutora de um material supercondutor cuja temperatura é imposta muito perto da temperatura de transição.

Turbomolecular – Instrumento de bombeamento de alto-vácuo, ou vácuo primário, através da colisão das partículas dos gases do volume com pás inclinadas a rodar a velocidades extremas.

Voice-coil – atuador elétrico cujo funcionamento é semelhante ao de uma coluna, isto é, uma corrente elétrica é forçada numa bobine eletromagnética de modo a que o campo gerado force um íman permanente a deslocar-se.

ω_n - frequência de ressonância, ou frequência natural, a que um sistema sujeito a vibrações oscila.

$x(t)$ - Função utilizada para descrever o deslocamento da massa suspensa, em relação ao seu ponto médio.

$y(t)$ – Função utilizada para descrever a movimentação de um extremo da suspensão face ao seu ponto médio.

$z(t)$ – função que quantifica a diferença entre $y(t)$ e $x(t)$, correspondente à elongação do sistema de suspensão.

Estrutura da Dissertação

Como estará patente por todo o documento, a minha participação envolveu todas as áreas do projeto, contudo, essa participação foi feita no seio de uma equipa pelo que, por uma questão de correção, irei referir-me ao projeto como um todo, fazendo apenas pequenas referências ao trabalho que produzi em concreto. O documento está, deste modo, organizado não em vista do trabalho que eu produzi, mas em vista das etapas do projeto que se desenrolaram.

Capítulo 1- Capítulo introdutório onde se descreve o enquadramento do trabalho que desenvolvi: O projeto; as responsabilidades do grupo; aquelas que acabaram por ser as minhas responsabilidades e atividades.

Capítulo 2- Fundamentos teóricos que são essenciais à compreensão dos racionais aplicados no design da experiência, assim como aos cálculos feitos durante todo o decorrer do projeto.

Capítulo 3- A suspensão que foi proposta e desenhada pelo grupo de Espanha e a definição dos requisitos e funcionalidade do instrumento a ser desenvolvido pelo grupo centra-sim.

Capítulo 4- Relato sobre: o desenvolvimento do instrumento/experiência; as principais considerações feitas durante a implementação; as principais dificuldades com que nos deparamos.

Capítulo 5- Apresentação dos resultados medidos e uma análise das conclusões a fazer.

Capítulo 6- Consideração sobre o trabalho efetuado e sobre o projeto: Análise sobre o decorrer do projeto; o que incorreu em maiores dificuldades; Os atividades que mostraram mais sucesso; Observações e conclhos sobre a produção e implementação de instrumentos desta natureza e características.

1 Introdução e contexto

A minha dissertação foi realizada no âmbito de um projeto ESA, denominado LEVISOLATOR(esa, 2014) .

A minha contribuição para este projeto foi iniciada no primeiro semestre do quinto ano (2015/2016) e foi prolongada até à conclusão de todas as disciplinas (fevereiro 2017), momento em que comecei a produção deste documento

A minha participação envolveu, como inicialmente aspirava, um grande número de competências de tecnologia e engenharia, tendo sido uma oportunidade não só para desenvolver as faculdades que adquirir no curso, como também para desenvolver capacidades em áreas não estudadas. Foi sobretudo também um momento único para o desenvolvimento de competências transversais como o trabalho em equipa, a resiliência face a contratempos, o trabalho não perfeccionista sobre *stress* , entre tantas outras.

Esta fase promoveu assim um ambiente perfeito para a minha maturação como engenheiro já que me impôs um contacto direto com as responsabilidades e dificuldades de uma atividade de desenvolvimento técnico. A autonomia e responsabilidades a mim oferecidas revelaram-se uma experiencia árdua, porém, graças ao apoio e orientação que o meu orientador facultou, revelou ser uma prova extremamente construtiva e, penso, um salto essencial para a minhas competências. A confiança em mim depositada pelo meu orientador foi fulcral a este processo.

1.1 O projeto

O trabalho realizado, como referido, enquadra-se num projeto da ESA, referente à missão L2-ATHENA(‘Athena’,2017). Em suma, um telescópio espacial para a aquisição de espectros espacialmente resolvidos nos comprimentos de onda do raio-X.

A deteção será feita, pelo menos em parte, por um detetor TES. Estes detetores estão otimizados para temperaturas muito baixas ($\sim 10^2$ mK)(MIT *Experimental Cosmology and Astrophysics Laboratory*, 2017), pelo que o arrefecimento e isolamento térmico são pontos cruciais no *design* destes sistemas de deteção.

Em anteriores projetos da ESA, a solução para o posicionamento e fixação de detetores criogénicos destes foi a utilização de filamentos de *Kevlartm*. Estes apresentam características mecânicas excecionais, não comprometendo a baixa condução térmica(esa, 2014).

No entanto, os resultados dessas experiências revelaram desvantagens:

- A otimização deste suporte tem de ser feita tendo em conta não só os momentos de operação do sistema no espaço, mas sim também os momentos da descolagem do foguetão que transportará o satélite. Os fios terão de ter, então, uma secção transversal maior, aumentando tanto a condução térmica como a rigidez do sistema.
- As vibrações transmitidas pela estrutura de suporte a estes cabos levam, por intermédio da expansão e contração não elástica dos mesmos, à produção e transmissão de calor ao sistema de deteção, dificultando o processo de arrefecimento e limitando a sensibilidade do mesmo.

O projeto em foco no meu estágio, de título *L2-ATHENA High Performant Cryogenic Vibration Isolator and Thermal Disconnect Based on Superconducting Levitation*, tem como objetivo o desenvolvimento, produção e caracterização de uma suspensão para estes detetores criogénicos que

permita o suporte mecânico e isolamento de vibrações da estrutura assim como manter um nível de condução térmica diminuta.

1.2 Solução proposta

A solução proposta é a de uma suspensão magnética supercondutora. Apelidada de LEVISOLATOR, por se tratar de um *Levigator and Isolator*.

A utilização de uma suspensão de levitação magnética permite uma condução térmica nula, havendo apenas transmissão de calor por radiação, e uma quantidade ainda menor por convecção (em vácuo), o que perfaz uma potência transmitida relativamente reduzida (comparando com as quantidades normalmente transmitidas por condução ou convecção). Conseguindo assim o isolamento térmico requerido desta suspensão.

Contudo, a levitação magnética, com recurso apenas a ímanes, sofre de instabilidade, pelo que se optou pela utilização conjunta de ímanes e materiais supercondutores. A temperatura da interface mais fria da suspensão é de 15K, pelo que o emprego de supercondutores não apresentará um constrangimento térmico adicional (Han and Kim; Moon and Chang, 1994; Schweitzer and Maslen, 2009).

O desenho de suspensões supercondutoras não é simples, já que o comportamento dos supercondutores não são simples de modelar, e portanto, de simular. Sendo, deste modo importante o recurso a testes e caracterizações experimentais.

As preocupações principais são as dependências térmicas da resposta magnética, o dimensionamento da suspensão para a força e rigidez pretendidas e o possível relaxamento da suspensão com o tempo.

A existência de sistemas de levitação supercondutora como o comboio SCMaglev servem como demonstração de que, ainda que complexos, estes tipos de sistemas são, regra geral, factíveis.

Aos constrangimentos da suspensão magnética supercondutora acrescenta-se a dificuldade em o sistema ser desenvolvido para operar tanto na terra como no espaço. As diferenças provenientes da interação gravítica terrestre para os dois casos fazem com que o deslocamento constante causado pelo peso do detetor altere as características da suspensão (a dimensão do deslocamento é elevada relativamente à amplitude de operação da suspensão). Outro efeito a mitigar.

1.3 Participação do grupo CENTRA-SIM (FCUL)

O projeto pode ser formalmente dividido em duas componentes: o desenho e produção da suspensão e os testes e caracterização.

O desenho e produção da suspensão ficaram ao encargo do grupo da Universidade de Alcalá e da empresa MAGSOAR, S.L (Valdemoro, Madrid).

O teste e caracterização da suspensão foram responsabilidade do grupo Centra-SIM, FCUL.

Os testes pretendem simular o funcionamento da suspensão no ambiente previsto para o seu funcionamento, isto é, em vácuo e em criogenia. Mais informações sobre quais os testes e requerimentos do experimento serão apresentadas no subcapítulo 3.2.

O projeto foi também dividido em dois períodos:

1ª fase – Produção das componentes principais preliminares e efetuar os testes mais críticos(6 meses). Esta fase permitirá fazer prova da aplicabilidade da tecnologia, com custos reduzidos.

2ª fase – Produção e otimização do protótipo final, testes, caracterização e demonstração de funcionamento (18 meses).

Durante a minha participação, o grupo trabalhou na 1ª fase do projeto.

Foi, assim, adquirido uma câmara de vácuo cilíndrica com uma altura de cerca de 80 cm e um diâmetro de cerca de 50 cm, um sistema de bombeamento de vácuo, um sistema de refrigeração criogénica, um motor linear (Voice-coil) preparado para vácuo, um distanciómetro laser, dois sensores de força, outros sensores e a eletrónica para empregar todas essas tecnologias.

O sistema de teste tinha que chegar a $\sim 10^{-7}$ mbar, 15K com uma condução inferior a 1W e ser capaz de oscilar a suspensão com uma amplitude mínima de 0,1mm a 100 Hz, correspondente à escala de forças dos 100N.

1.4 A minha participação

Como já mencionado, neste projeto tive a oportunidade de estar envolvido nas mais variadas fases do desenvolvimento e em vários ramos tecnológicos diferentes. Devido à pequena extensão temporal do projeto as funções a mim atribuídas raramente consistiam em tarefas circunscritas a mim. Assim sendo, muito do que fiz durante o projeto foi colaborar tanto na fase de discussão e resolução de problemas como em implementações parciais de tecnologias.

No decurso deste projeto participei nas principais atividades:

Desenho e simulação mecânica e térmica, de peças relevantes ao projeto:

Participei em todas as actividades de concepção e desgin da estrutura da experiência, em especial na concepção do sistema de forçamento. Foi da minha responsabilidade a simulação térmica das torres e das tranças de cobre condutoras, que impuseram o calcular e carregar dos parâmetros destes materiais a baixas temperaturas.

Desenvolver programas de Labview, Arduino-wiring/processing e C, para a eletrónica de aquisição e controlo:

Nas diferentes tentativas de implementação do sistema eletrónico de aquisição e controlo, que foram a placa de aquisição da National InstrumentsTM, o Arduino Due e o BeagleBone, fui encarregado de produzir software nas linguagens de programação correspondentes(Labview, wiring/processing, C), tendo tido um papel mais consultivo e colaborativo na última.

Produção de circuitos eletrónicos de adaptação de sinal e isolamento:

Estive envolvido desde a conceção até à implementação de todos os circuitos elétricos desenvolvidos nesta experiência. Consistindo em circuitos de adaptação do sinal produzidos pelos vários sensores. Apenas na última versão da eletrónica, a minha autoria não foi integral, sendo necessário colaborar no intuito de não incorrer em mais atrasos.

Instalação e montagem dos mais variados sensores e atuadores

Montagem do sistema elétrico e eletrónico complexo da experiência como um todo (questões da referência de tensão):

Coube-me a mim a montagem dos vários sistemas elétricos e eletrônicos da experiência (Ainda que a montagem dos termômetros tenha recaído sobre o meu colega Tiago Frederico). Tendo sido a referência de tensão comum, sem dúvida, a questão mais complicada.

Foram da minha responsabilidade as seguintes funções:

Atuação do sistema magnético de bobine através do paradigma PWM (incluindo controlador por H-bridge).

O desenvolvimento de um sensor de posicionamento tridimensional, a operar em vácuo, sem contato mecânico, e a baixas temperaturas. A respetiva caracterização e eletrónica de operação:

Um sistema que foi integralmente desenvolvido, mas não implementado, tendo, no entanto, sido feitas todas as experiências necessárias para confirmar a aplicabilidade do sistema. Mais informações sobre este sistema são apresentadas no subcapítulo 4.6.

2 Introdução teórica

A informação aqui apresentada foi retirada dos livros sobre vibração, oscilação e suspensões: Fundamentals of mechanical vibrations, McGraw Hill, S.Graham Kelly, 2nd edition, 2000; Mechanical Vibrations, Prentice Hall, Singiresu Rao 5th edition, 2010; e dos diapositivos de apresentação: Análise de sistemas vibratórios, Pedro V. Gamboa, 2016, departamento de ciências aeroespaciais Universidade da Beira Interior.

2.1 Teoria de suspensões

Uma suspensão é um dispositivo mecânico que permite o posicionamento de um objeto, fornecendo isolamento dinâmico do seu suporte. O subcapítulo apresentado centra-se, assim, no conceito de isolamento de vibração.

2.1.1 Vibrações com um grau de liberdade

Começamos assim por uma introdução aos conceitos de vibração.

As vibrações dão-se como resultado do afastamento de um sistema do seu ponto de equilíbrio estável.

Num desvio relativamente diminuto em posição e velocidade do sistema ao ponto de equilíbrio, as interações do sistema com o exterior podem ser modeladas pelo segundo coeficiente da expansão de Taylor, isto é, como relações lineares. Por conveniência de cálculo, e porque se trata de uma equação diferencial, é possível centrar o referencial no ponto de equilíbrio (e posteriormente calcular o fator constante através das condições iniciais e de fronteira). Tornando-se a expansão de Taylor em expansão de MacLaurin.

Assim, a segunda lei de Newton permite-nos equacionar diretamente a trajetória de um objeto pela equação (2.1.1) e pelas condições de fronteira (2.1.2):

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} = -Kx - C\dot{x} \quad (2.1.1)$$

$$x(t_0) = x_0, \dot{x}(t_1) = \dot{x}_1 \quad (2.1.2)$$

Onde F representa a força, m a massa, x o deslocamento relativamente ao mínimo energético, K o coeficiente da expansão de MacLaurin da força relativamente ao deslocamento e C o coeficiente da expansão de MacLaurin da força relativamente à velocidade.

2.1.2 Vibração unidimensional não amortecida

Se pretendermos resolver a equação para a situação em que o amortecimento é nulo, pode-se considerar a equação sem a parcela em C. Torna-se assim uma equação diferencial de segundo grau com um espaço de soluções de duas dimensões.

Assim, e tendo em conta a periodicidade que caracteriza uma vibração, testa-se como base de soluções as funções sinusoidais:

$$x(t) = a \sin(\omega t) + b \cos(\omega t) \quad (2.1.3)$$

Esta expressão pode ser convertida por identidades trigonométricas na forma mais perceptível:

$$x(t) = A \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.1.4)$$

Onde:

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.1.5)$$

A solução dá-se para a frequência que valida a expressão:

$$\omega_n^2 = \frac{K}{m} \quad (2.1.6)$$

Vamos apelidar este valor de frequência própria ou natural, já que depende apenas das características intrínsecas ao sistema e utilizar a sigla ω_n para o referir.

A aplicação das condições de fronteira de (2.1.2) permite determinar univocamente a função $x(t)$.

Esta análise é importante já que corresponde à oscilação de um objeto relativamente a um ponto de equilíbrio, no âmbito de um potencial conservativo, e é, portanto, a base da compreensão conceptual de um sistema oscilatório. Contudo, este sistema serve principalmente para facilidade de construção matemática e racional, já que a total ausência de amortecimento faria com que o sistema acumulasse movimentos oscilatórios, tipicamente fugindo dos limites de aproximação de um potencial conservativo. Sendo também impossível produzir um sistema com amortecimento nulo, seja este linear em relação à velocidade ou não.

Desta construção pode retirar-se que um sistema oscila com uma frequência superior quanto maior é a sua rigidez (variação da força com o deslocamento) e quanto menor for a sua inércia.

O formalismo matemático apresentado permite calcular a dependência temporal do deslocamento quando se trata de um problema de condições de fronteira e iniciais, isto é, permite prever o estado do sistema após um intervalo de tempo, mas só se nada interagir com o sistema. A formulação para um sistema com forçamento externo será tida em conta no seguimento deste documento, mas só para um sistema mais completo e geral.

2.1.3 Vibração unidimensional amortecida

Para a solução da equação (2.1.1) será necessário adicionar um grau de liberdade à expressão (2.1.4).

Se considerarmos a equação diferencial (2.1.1) com $K=0$, ficamos com uma equação diferencial em que a segunda derivada da função é proporcional à primeira derivada. Sabendo que a derivada da função ser proporcional à mesma é uma característica de uma função exponencial, testa-se uma base de funções exponencial.

O resultado de tal experimento teórico é a consciência de que para um sistema amortecido com “dureza” nula a amplitude do movimento decai exponencialmente.

Assim, para a base de soluções do sistema testa-se a solução encontrada para um sistema não amortecido modelada por um envelope de uma função exponencial:

$$x(t) = A e^{\beta t} \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.1.7)$$

Porém, de forma a simplificar os cálculos utiliza-se a seguinte representação da solução

$$x(t) = \text{Re}(Ae^{\beta t} e^{i(\omega t + \varphi)}) \quad (2.1.8)$$

Sendo que $\text{Re}(x)$ representa o operador linear que retorna a parte real de x .

Porque o operador $\text{Re}(x)$ é linear e o problema também o é, a equação pode ser resolvida no espaço dos complexos, e a solução encontrada aplicando o operador $\text{Re}(x)$ à solução. Assim sendo, a representação (2.1.8) de $x(t)$, no âmbito da solução no espaço dos complexos, pode ser ainda simplificada na seguinte forma:

$$x(t) = \text{Re}(\mathbf{x}(t)) = \text{Re}(\mathbf{A}e^{\alpha t}) \quad (2.1.9)$$

Onde a notação a negrito indica um valor complexo.

Inserindo (2.1.9) em (2.1.1) obtém-se a seguinte condição:

$$\begin{aligned} \text{Re}\left(m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2}\right) &= \text{Re}(-K\mathbf{x} - C\dot{\mathbf{x}}) \Leftrightarrow \alpha^2 m \mathbf{A}e^{\alpha t} = -K\mathbf{A}e^{\alpha t} - C\alpha \mathbf{A}e^{\alpha t} \\ \Leftrightarrow \alpha &= -\frac{C}{2m} \pm \sqrt{\frac{C^2}{4m^2} - \frac{K}{m}} \end{aligned} \quad (2.1.10)$$

O sinal resultante da expressão no interior da raiz quadrada dita o comportamento da solução. Sendo que uma constante imaginária no expoente corresponde a uma oscilação (duas frequências simétricas), esta dá-se para o intervalo de solução da seguinte inequação:

$$\frac{C^2}{4m^2} - \frac{K}{m} \leq 0 \quad (2.1.11)$$

Este intervalo é: $]-\infty; C_c]$, onde C_c é o amortecimento crítico. Este toma o valor de $2(Km)^{1/2}$ e corresponde ao mínimo valor de amortecimento para que não haja componentes de oscilação na solução.

Para que o estudo da solução possa ser generalizado a vários sistemas, o amortecimento do sistema é normalizado ao amortecimento crítico, $\xi = C/C_c$.

A equação (2.1.1) ganha assim a seguinte forma no espaço dos complexos:

$$\ddot{\mathbf{x}} + 2\xi\omega_n\dot{\mathbf{x}} + \omega_n^2\mathbf{x} = 0 \quad (2.1.12)$$

E a solução é escrita:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}e^{-\xi\omega_n t + \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}t} + \mathbf{B}e^{-\xi\omega_n t - \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}t} \quad (2.1.13)$$

Uma vez mais as constantes A e B podem ser equacionadas com as condições de fronteira e iniciais devidas. Este processo de cálculo equivale a representar as condições iniciais e de fronteira no espaço de solução da equação diferencial que governa o sistema. Esta noção de projecção sobre o espaço de soluções será muitas vezes evocada no seguimento deste documento.

Podemos constatar assim que o sistema irá oscilar com determinada frequência enquanto a amplitude desta oscilação se esmorecerá de forma exponencial.

Torna-se claro através da análise da forma da solução que o fator ξ afeta não só o decaimento da amplitude de oscilação como a frequência da própria. Num registo intuitivo, o amortecimento introduz uma força contrária ao movimento, o que irá logicamente retardá-lo. Não podendo a frequência de vibração ser superior à frequência natural do sistema, já que o coeficiente de amortecimento, pelo menos neste âmbito, será sempre real.

É evidente também que, tomando $\xi=0$, a solução converge para a solução encontrada para o sistema não amortecido.

2.1.4 Oscilação forçada de um sistema unidimensional

Até ao momento foram apresentadas soluções para a propagação temporal de um sistema cujas condições em determinado instante são conhecidas, isto é, foram tidas em conta as características (lineares e constantes) de um sistema, e um ponto arbitrário, e através dessa informação foi extrapolada a trajetória do sistema tendo por base a mecânica Newtoniana e a lei de Hooke.

Contudo o objetivo desta dissertação e do projeto ESA não foi o de estudar a dinâmica de sistemas harmónicos isolados. O objetivo foi o de desenhar e testar uma suspensão mecânica para o sistema de aquisição de imagem do telescópio. Para tal iremos avaliar a situação em que para além do normal perpetuar de um sistema harmónico estacionário, este terá a imposição de uma força externa ao sistema.

Assim sendo, considera-se um sistema constituído de uma massa acoplada a um ponto de referência através de uma mola e amortecedor ideais e uma força aplicada diretamente sobre a massa. Neste modelo a força que se aplica sobre a massa é independente da posição.

Para tal, e tendo por base a equação homogénea (2.1.12), adiciona-se um termo não homogéneo:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{F(t)}{m} \quad (2.1.14)$$

Tomaremos futuramente $f(t) = F(t)/m$, onde $F(t)$ corresponde à função complexa cuja parte real iguala a força aplicada ao sistema de suspensão e a parte complexa o desfaseamento relativamente ao instante de referência.

O espaço de soluções será então composto pela solução homogénea apresentada no subcapítulo anterior e por uma solução particular. O processo pelo qual esta solução particular é calculada depende grandemente da forma de $f(t)$. Nesta avaliação é de realçar a importância da linearidade da equação e do consequente resultado da sobreposição de soluções.

Para excitações de cariz periódico, é comum representar $f(t)$ por funções sinusoidais (os teoremas de Fourier comprovam a possibilidade da decomposição de funções periódicas numa soma de funções sinusoidais) e avaliar a solução através do método dos coeficientes indeterminados (Procurar uma solução com uma forma semelhante a $f(t)$).

Outros métodos e análises existem para quando se quer calcular resultados: para interações instantâneas, considerando apenas o impulso transmitido como condição de fronteira; para interações não periódicas e para interações que se regem por modelos aleatórios.

Neste projeto foram avaliadas as interações quasi-periódicas, isto é, interações com periodicidade suficientemente pequenas para serem modeladas por sobreposição de sinusoides num intervalo de tempo aceitavelmente maior do que o período dessas sinusoides. Assim, apresenta-se de seguida a análise matemática para forçamentos (interações externas) sinusoidais.

Considerando o resultado da sobreposição do sistema, $f(t)$ será modelado da seguinte forma:

$$f(t) = A * e^{i\omega t} \quad (2.1.15)$$

A resposta do sistema a uma excitação pode ser calculada através do princípio da sobreposição.

Da base de solução proposta resulta uma equação da dinâmica:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = A * e^{i\omega t} \quad (2.1.16)$$

Como referido, a metodologia matemática comum neste passo é a da utilização do método dos coeficientes indeterminados, usando como base da solução particular a função:

$$x(t)_p = C * e^{i\omega t} \quad (2.1.17)$$

Onde a utilização de uma constante C complexa concede um grau de liberdade referente à fase da solução em relação ao forçamento.

Inserindo a solução proposta na equação (2.1.16) facilmente se chega ao seguinte resultado:

$$C = \frac{A}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_n\omega)^2}} * e^{-i \arctan\left(\frac{2\xi\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}\right)} \quad (2.1.18)$$

Podemos constatar que a solução particular é linearmente independente da solução homogénea. Por norma a solução homogénea é ignorada já que esta tem um comportamento de declínio exponencial com o tempo e, em contraste, a solução particular não sofre alterações temporais e, portanto, a menos que o comportamento do sistema nos instantes iniciais (referindo os primeiros dois ou três períodos correspondentes à constante de tempo do sistema homogéneo, isto é, $1/\xi\omega_n$) sejam de grande interesse, o seu estudo é propositadamente negligenciado. Outra razão para o fazer é o facto de a resposta homogénea ser naturalmente sempre limitada, não se apresentando como um assunto tão grave como a resposta do sistema em frequência de ressonância, como será descrito posteriormente.

O resultado obtido é geralmente normalizado em todos as variáveis possíveis de modo a permitir uma análise o mais genérica possível dos resultados. Assim, define-se r (ou β em outras fontes) como a razão entre ω e ω_n .

A expressão (2.1.18) equaciona-se da seguinte forma:

$$X = \frac{C * \omega_n^2}{A} = \frac{C * m * \omega_n^2}{F_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}} * e^{-i \arctan\left(\frac{2\xi r}{1 - r^2}\right)} \quad (2.1.19)$$

Onde X corresponde à amplitude complexa da solução, por unidade de força normalizada a K ($\omega_n^2 * m / F = K / F$), ou seja, é um fator complexo que quantifica o deslocamento face à força normalizada à rigidez da mola.

Este número complexo é normalmente analisado na sua amplitude real, deslocamento máximo verificado pelo sistema em relação ao ponto de estabilidade, apelidado de fator de ampliação (M , ou α em outras fontes), e pelo desfasamento relativamente à força de excitação (em diferença de grau de fase), ângulo de desfasamento (α grau, ou φ em outras fontes).

A expressão apresenta-se assim como uma forma de inverso de função de transferência entre a força externa(normalizada) e a amplitude do deslocamento relativamente ao ponto de equilíbrio.

Os valores de $\alpha(=M)$ e $\alpha \text{ grau}(=\phi)$ apresentam-se, na sua dependência com $\beta(=r)$, nos gráficos seguintes:

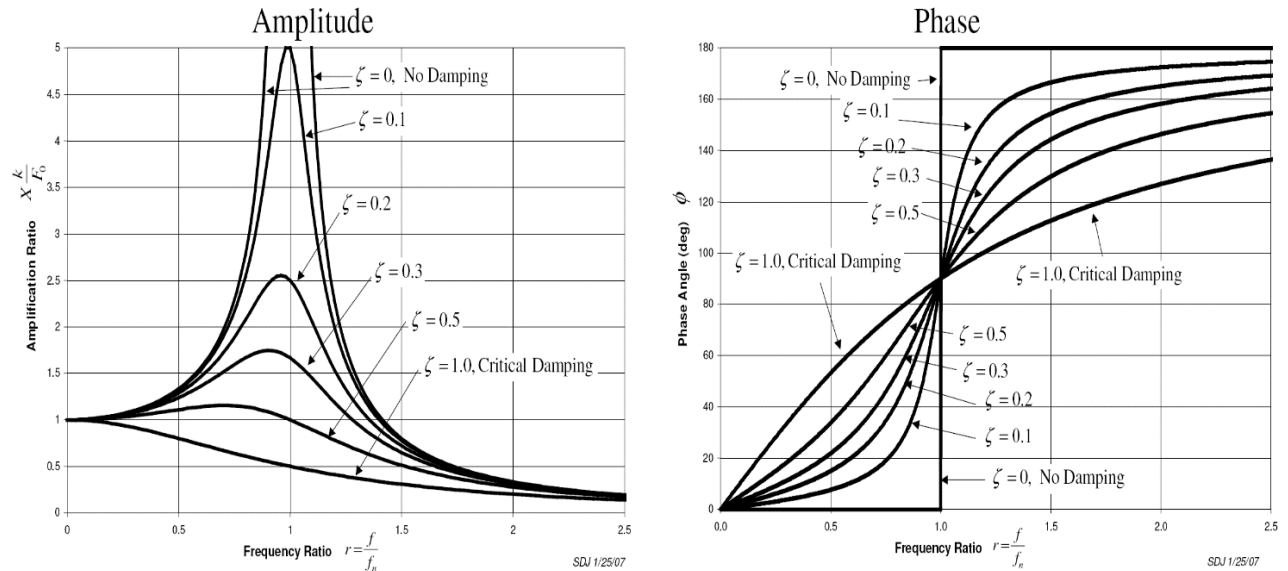


Figura 2.1-Dependência, em frequência, da amplitude(normalizada) e do desfaseamento da oscilação da massa relativamente à força excitadora, para vários valores do coeficiente de amortecimento (ζ).

Para frequências muito inferiores à frequência de ressonância, a resposta do sistema é dominada pela rigidez da mola sendo a amplitude sensivelmente a razão entre a força excitadora e a constante de elasticidade ($F_{\text{máx}}/m\omega_n^2$). Dando um fator de ampliação de 1.

À medida que a frequência de excitação aumenta a impedância correspondente à inércia da massa aumenta com ω^2 e esta vai contrariando a impedância que a mola oferece, por isso a amplitude tem um crescimento monótono até à frequência de ressonância.

À frequência de ressonância (correspondente ao máximo de amplitude para cada fator de amortecimento, diminuindo esta com um amortecimento maior) a impedância da mola iguala, em norma durante um ciclo, a impedância da massa em movimento. A esta dita frequência o sistema maximiza a sua capacidade de captar energia. Esta transfere-se periodicamente entre energia cinética e potencial elástica e, portanto, a amplitude do sistema irá aumentar significativamente, estando apenas limitada pelo amortecimento que, sendo uma força não conservativa, irá dissipar continuamente a energia que o sistema capta.

É então o balanço entre a capacidade de captar energia por parte do sistema e a capacidade do mesmo de a dissipar pelo amortecimento que irá definir a amplitude máxima de oscilação.

A passagem de um regime dominado pela impedância da mola para um regime dominado pela impedância da inércia está patente na curva de atraso de fase. Aonde se deduz que a uma frequência inferior à de ressonância o sistema é capaz de acompanhar a excitação que lhe é incutida. Acima da frequência de ressonância o sistema perde esta capacidade já que a força imposta pela mola não é elevada o suficiente para deslocar a massa à frequência que se pretende, resultando num atraso que tende para

meio período, atraso no qual o sistema simplesmente deixa de conseguir captar energia da excitação externa.

Para amortecimento nulo, a ausência deste faz com que o sistema tenha facilidade em manter um atraso nulo antes da frequência de ressonância e um atraso de meio período após a frequência de ressonância. No caso de existir amortecimento a inércia acrescida faz com que o sistema não consiga seguir a excitação e, portanto, o atraso começa a verificar-se logo nas frequências baixas, tendo um crescimento mais gradual. A mesma inércia faz com que o sistema não se atrase tanto após a frequência de ressonância, à custa, no entanto, de uma amplitude de deslocamento muito mais reduzida.

2.1.5 Teoria de suspensões lineares com parâmetros constantes, para um grau de liberdade.

Nos subcapítulos anteriores introduzi a formulação matemática e os resultados intuitivos necessários para compreender o funcionamento de uma suspensão. Na realidade introduzi apenas os conceitos de vibração e a resposta de um sistema a um forçamento sinusoidal.

O propósito de uma suspensão é o de, como a palavra sugere, suspender um objeto. Contudo, as suspensões não têm a funcionalidade de fixar objetos, a isso chama-se um suporte, o propósito de uma suspensão é o de amortecer e isolar um sistema das forças dinâmicas externas a este. Deste modo, a capacidade de um sistema vibrante de absorver energia e a dissipar (ao longo do tempo) é o que faz com que as suspensões (pelo menos as passivas) sejam tipicamente baseadas em sistemas de vibração. De outro ponto de vista, um sistema que capte energia, ou é controlado ativamente, ou terá a tendência a gerar algum tipo de oscilação.

As suspensões podem ser divididas em suspensões ativas e passivas. Sendo que as primeiras recorrem a sensores, processamento e atuadores para otimizar a resposta da suspensão, enquanto as suspensões passivas estão apenas dependentes das respostas mecânicas dos componentes da suspensão.

Não obstante, as suspensões dividem-se também no propósito que apresentam, isto é, a excitação da suspensão pode ser alcançada de diferentes modos e os objetivos da suspensão podem ser distintos. Por exemplo, pode-se desenhar uma suspensão para isolar um carro de forças demasiado elevadas sobre a estrutura ou, noutro exemplo, desenvolver uma suspensão para que um edifício fique imóvel durante um tremor de terra.

Assim sendo, uma suspensão, como sistema, define-se:

- pelo modo de excitação: imposição do deslocamento do extremo da suspensão ou pela aplicação de uma força no objeto de vibração (massa).
- Pelas variáveis sujeitas a constrangimentos/otimização: restrições de força em algum ponto do sistema ou limites ao deslocamento destes.

Existem dois modelos gerais para um sistema de isolamento de vibração:

1. A força é aplicada diretamente na massa oscilante e o sistema proporciona isolamento para a base (extremidade da suspensão).
2. A base de apoio vibra e a suspensão proporciona isolamento para a massa suspensa.

Para o projeto ISOLATOR só nos interessa modelar um sistema do tipo 2, já que pretendemos isolar o detetor da vibração proveniente da estrutura do satélite.

Neste modelo define-se:

- $y(t)$, o deslocamento da base face ao posicionamento médio (assume-se um retorno a um ponto fixo, na realidade isto corresponde a dizer que a estrutura do satélite, ainda que transmita vibração, não se vai deformar permanentemente, e que a posição do sistema não vai ser alterado);
- $x(t)$, o deslocamento da massa face ao seu ponto de equilíbrio (definido tendo a base estática no seu ponto médio);
- m , a massa oscilante do sistema;
- K , a constante de elasticidade da mola e C , a constante de amortecimento do amortecedor.

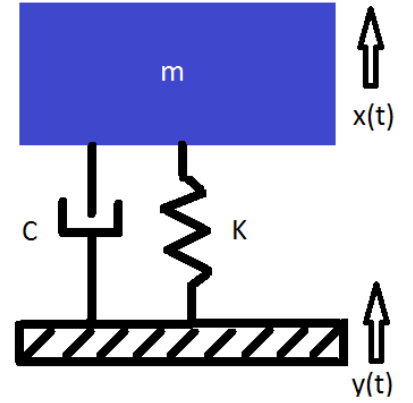


Figura 2.2 Esquema ilustrativo do modelo de um sistema passivo de isolamento de vibração

A Figura 2.2 fornece um grafismo elucidativo relativamente às definições feitas.

A excitação da vibração dá-se pela oscilação da base e é, portanto, definida por $y(t)$. Sendo um sistema linear, opta-se por analisar o comportamento para uma frequência única. A resposta da suspensão a uma função arbitrária pode depois ser obtida através do princípio da sobreposição, sobrepondo a resposta a um conjunto infinito de frequências de excitação.

A equação que rege a dinâmica do sistema é a seguinte:

$$m\ddot{x} + C(\dot{x} - \dot{y}) + K(x - y) = 0 \quad (2.1.20)$$

De modo a se poder aplicar a matemática desenvolvida constrói-se a variável z , a elongação real da mola, $(x-y)$. Podendo rescrever a expressão (2.1.20) do seguinte modo:

$$\ddot{z} + \dot{z} * \frac{C}{m} + z * \frac{K}{m} = -\ddot{y} \quad (2.1.21)$$

De notar que a equação corresponde à de um sistema de vibração forçada, com força igual à segunda derivada de y relativamente ao tempo multiplicada da massa do objeto suspenso.

Como referido $y(t)$ será analisada espectralmente pelo que tomamos:

$$y(t) = Y e^{i(\omega t)} \quad (2.1.22)$$

Onde Y , corresponde à amplitude complexa atribuída à vibração na frequência ω .

Assim temos:

$$\ddot{z} + 2\xi\omega_n\dot{z} + \omega_n^2 z = -\omega^2 Y e^{i(\omega t)} \quad (2.1.23)$$

Expressão esta que se inteira na categoria dos forçamentos cuja amplitude tem dependência em ω^2 .

A solução passa, como já vimos, pela utilização do método dos parâmetros indeterminados, utilizando como base:

$$z_p(t) = C * e^{i\omega t} \quad (2.1.24)$$

Obtendo o coeficiente **C**. Este mostra uma relação generalizada, quando normalizado, à amplitude de excitação:

$$Z = \frac{C}{Y} = \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} * e^{-i \arctan\left(\frac{2\xi r}{1-r^2}\right)} \quad (2.1.25)$$

De notar que a devido à excitação ser imposta em deslocamento e não em força, a amplitude não tem de ser normalizada a ω^2 nem a m , já que o aumento de força necessário para manter a amplitude com uma frequência maior ou massa maior é imposto ao sistema de forçamento quando este mantém a amplitude da base.

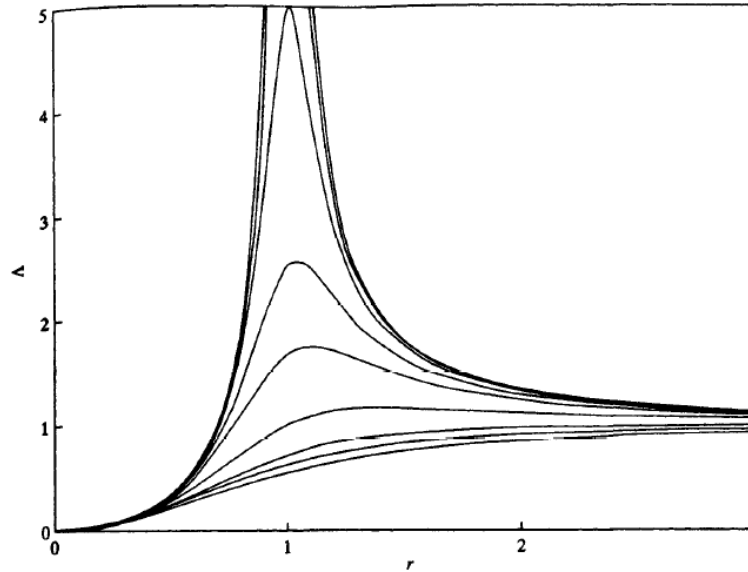


Figura 2.3- Razão entre as amplitudes de oscilação da massa suspensa (relativamente à base) e a da base em função da frequência, para vários valores de amortecimento.

O gráfico do desfasamento de $z(t)$ relativamente a $y(t)$ é igual ao das distribuições já apresentadas.

Na Figura 2.3 podemos observar que a distribuição tem um valor inicial de 0, isto deve-se a o facto de se tratar da amplitude de elongação da mola em função da oscilação da base e não da oscilação da posição da massa. Podemos também verificar que para frequências muito elevadas a amplitude tende para 1, ou seja, a mola comprime e distende a mesma amplitude que a base oscila.

Este fator Z permite calcular a amplitude de oscilação da mola em função da amplitude da oscilação da base.

Este fator serve também de apoio matemático para o caso em que se pretende saber qual a amplitude oscilação da massa relativamente a um referencial de inércia aonde a base descreva uma oscilação periódica (referencial inercial não solidário com a base). Deste modo, basta calcular:

$$(z_p(t) + 1) * y(t) = x(t) \quad (2.1.26)$$

Assim sendo, utilizamos (2.1.24), (2.1.25) e (2.1.26) para obter T , a transmissibilidade, isto é, o parâmetro que caracteriza a transferência de amplitude da base para o objeto suspenso:

$$T = \frac{\mathbf{X}}{\mathbf{Y}} = \frac{r^2 + (2\xi r)^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} * e^{-i \arctan\left(\frac{2\xi r^3}{1+(4\xi^2-1)r^2}\right)} \quad (2.1.27)$$

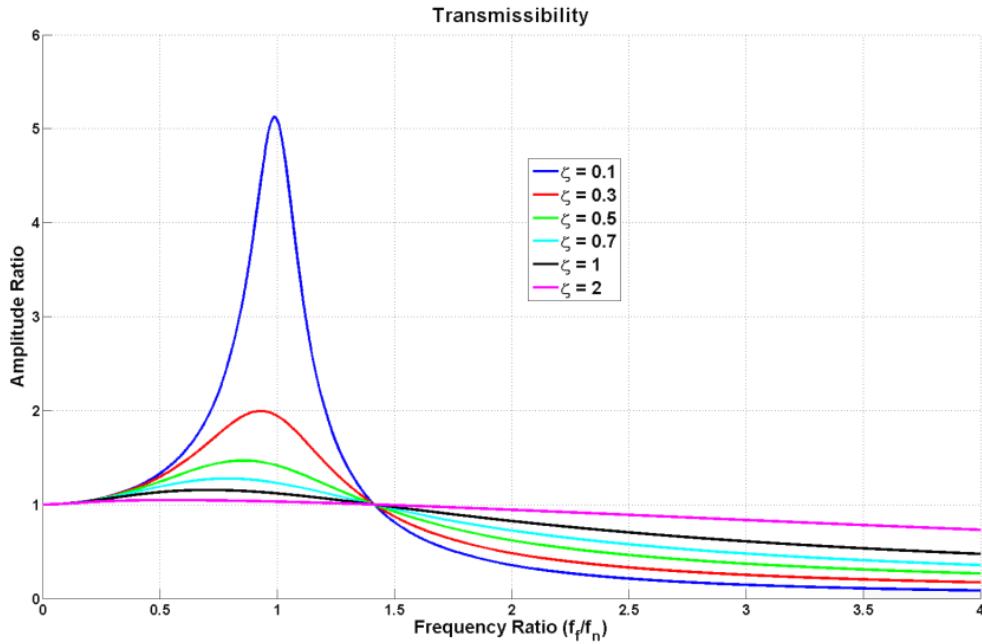


Figura 2.4 – Módulo da transmissibilidade em função da frequência normalizada para vários valores do coeficiente de amortecimento.

As características mais marcantes da função apresentada são que, para qualquer amortecimento, à frequência normalizada de raiz de dois a amplitude é 1, e que para frequências superiores quanto maior for o amortecimento maior será a amplitude (o isolamento dá-se pior para constantes de amortecimento superiores, algo que não acontecia nas funções que observamos previamente).

O fator de transmissibilidade tem uma utilidade central não só em saber qual a razão de amplitudes, mas também porque a força aplicada no sistema de suspensão depende deste fator, como se irá ver de seguida.

Para avaliar a força que o braço da suspensão exerce (mola+amortecedor), utiliza-se a seguinte expressão:

$$F_{braço} = K(x - y) + C(\dot{x} - \dot{y}) \quad (2.1.28)$$

Por outro lado, tendo em conta a equação (2.1.20) e a definição de z (x-y):

$$Kz + C\dot{z} = -m\ddot{x} \quad (2.1.29)$$

Assim, utilizando (2.1.27) é possível deduzir o resultado da expressão anterior:

$$F_{braço} = Ym\omega^2 \sqrt{\frac{r^2 + (2\xi r)^2}{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \cos\left(\omega t - \arctan\left(\frac{2\xi r^3}{1+(4\xi^2-1)r^2}\right)\right)$$

As suspensões são tipicamente caracterizadas por:

- Graus de liberdade do movimento (um, na grande maioria dos casos)
- Massa a ser suspensa
- Forças e amplitudes máximas aplicadas, e em que ponto são aplicadas
- Fator das amplitudes (excitação vs- massa) ou o fator de forças ou razão entre força aplicada e amplitudes ou a razão entre amplitude de excitação e amplitude de movimento.
- Outros parâmetros referentes à resposta impulsiva (regime transiente)

2.2 Suspensões magnéticas

De seguida irei fazer uma pequena introdução aos conceitos basilares das suspensões magnéticas.

Denomina-se de suspensão magnética qualquer sistema de suspensão cujos efeitos que promovem a elasticidade, isto é, que promovam a estabilidade mecânica em torno de um ponto no espaço, sejam de origem magnética.

Tendo a norma das forças magnéticas uma dependência monótona decrescente não linear com a distância não é de admirar que se possa gerar mínimos da energia magnética, resultando no confinamento estável de objetos magnéticos no espaço. Contudo as dificuldades técnicas inerentes à criação de mínimos magnéticos fazem com que sistemas de suspensão magnética sejam muitas vezes impraticáveis ou ineficientes (a nível energético, mas também de outros custos).

A impraticabilidade surge como corolário do teorema de Earnshaw. Este comprova que cargas elétricas não podem ter um equilíbrio estável num campo elétrico estático. Por sinal, a demonstração aplica-se também a dipolos (de direção e magnitude fixa) em campos magnéticos estáticos (Han and Kim, no date; Moon and Chang, 1994).

A demonstração passa pela prova de que o Laplaciano do potencial magnético ($\Delta(-\mathbf{M} \cdot \mathbf{B})$), onde \mathbf{M} é a densidade de momento magnético e \mathbf{B} o campo de indução magnética) é nulo. Tal advém de o divergente e o rotacional de um campo magnético estático (na ausência de correntes e campos elétricos variáveis) ser nulo, como facilmente se comprova através das equações de Maxwell (wikipedia, 2017).

O teorema não se aplica, contudo, a campos magnéticos variáveis ou a momentos magnéticos que se orientem anti-paralelamente com o campo magnético. Assim, as possibilidades de levitação magnética estável são as seguintes:

- Suspensões magnéticas ativas, isto é, que o campo varia de acordo com um algoritmo de controlo (requer atuadores).
- Suspensões dinâmicas, ou seja, suspensões em que a indução de imanes permanentes em condutores leva à estabilidade do sistema.
- levitação em diamagnéticos de resistividade nula (supercondutores): suspensões onde a indução provocada pelo íman não é dissipada, resultando num campo de expulsão que proporciona levitação estável.
- Suspensões através da expulsão de campos e *flux pinning*.

Dos tipos apresentados os únicos métodos possíveis de serem implementados passivamente durante períodos elevados (semanas) são os que recorrem à utilização de supercondutores.

Estes apresentam a desvantagem de terem de ser operados a temperaturas bastante diminutas e, possivelmente em algumas situações, proporcionam forças relativamente pequenas quando em comparação com sistemas ativos.

Contudo, quando operados dentro dos limites corretos de temperatura e campo magnético, as suspensões magnéticas evidenciam-se como sistemas de elevada simplicidade e atingem uma eficiência de operação que permite funcionarem por intervalos de tempo elevados sem necessidade de manutenção ou fontes de energia externa.

Face ao assunto dou relevo à informação de que a força magnética resultante num íman é proporcional ao divergente do campo magnético e não ao campo em si, como é ideia comum (um íman tem sempre dois polos de sinal contrário, pelo que um campo magnético irá produzir torque, mas apenas uma variação do campo entre os polos irá gerar uma força que provoque uma aceleração transversal).

2.3 Suspensões supercondutoras

2.3.1 Um supercondutor: efeitos e consequências

A supercondutividade é um estado da matéria que se caracteriza pela ausência de resistividade elétrica.

O estado supercondutor foi descoberto em França no início do século XX, sem dúvida como resultado dos avanços feitos na época tanto no estudo da interação eletromagnética com os materiais como na área da criogenia. O estado foi assim descoberto acidentalmente aquando da medição das características de resistividade do chumbo a baixas temperaturas (temperatura crítica de 7,2K), na qual se mediu uma resistência nula, dentro da incerteza experimental.

Para demonstrar a completa ausência de resistividade foi induzida uma corrente num anel supercondutor, doravante enunciado como SC, e a mesma corrente foi medida dias depois, chegando à conclusão que esta não estaria a diminuir (ou pelo menos se encontrava num estado estacionário de variação não mensurável).

Vários testes foram feitos e em breve apareceram teorias macroscópicas sobre o efeito, tendo como base as teorias gerais sobre transições de fase, também a serem desenvolvidas na altura.

Com base no espectro de absorção em frequência de um SC, que apresenta uma forma de função de *heaviside* (salto quântico a partir de certa frequência, elevada), nas energias e dinâmicas da transição, na dependência do efeito com a massa dos átomos da rede, entre outros efeitos menos significativos, foi possível produzir uma teoria microscópica do fenómeno da supercondutividade. Apelidada de teoria BCS (Bardeen, Cooper e Schrieffer, os autores da mesma).

Esta teoria introduz a noção de que, a muito baixas temperaturas, eletrões do material conseguem ter uma interação de atração entre eles, mediada pela oscilação dos átomos na matriz cristalina. A interação entre os mesmos promove a passagem a um estado quântico coletivo dos dois eletrões.

Os pares de eletrões constituem assim um estado quântico conjunto (nomeados pares de Cooper). Como resultado do spin de um par de Cooper ser 0 ou 1, deixa de se verificar a anti-simetria relativa à troca de partículas, e, portanto, mais de um par de Cooper pode ocupar o mesmo estado. A baixas temperaturas (como é o caso de supercondutores) forma-se um Condensado de Bose-Einstein, isto é, a maioria dos pares de Cooper ocupam o estado de menor energia e, portanto, têm um comportamento idêntico, assim, os pares de Cooper como um todo apresentam um estado quântico macroscópico (que ocupa a totalidade do volume do supercondutor). Esta ocupação total por parte do estado quântico que

contém a maioria dos pares de Cooper é responsável pela resistividade nula do SC (os efeitos dissipativos já não conseguem interagir com os elétrons em singular por que estes se encontram num estado correlacionado) (Bardeen, Cooper and Schrieffer, 1955).

Como resultado direto da resistividade nula, o material apresenta uma resposta magnética de oposição aos campos magnéticos externos. O chamado diamagnetismo de Landau, que corresponde ao campo magnético resultante da excitação de correntes no material por parte dos campos magnéticos externos. Este campo produzido terá a direção do campo incidente e o sentido contrário ao mesmo.

Este diamagnetismo é perfeito, já que a resistividade é nula num supercondutor, sendo responsável pelo comportamento diamagnético absoluto (total cancelamento dos campos magnéticos no interior).

Contudo, aquando da transição supercondutora, o material irá expulsar o campo magnético do interior. Este efeito não é explicado pelo diamagnetismo de Landau, mas sim pelo efeito de Meissner. Efeito este que se apresenta como uma das características basilares de um SC. O efeito advém da energia livre no interior do material SC se tornar inferior através da expulsão do campo, levando de facto a que a expulsão se dê. O Interior do SC fica assim isento de campo magnético.

O campo magnético que um SC consegue expulsar é limitado e, juntamente com a temperatura, formam a fronteira Temperatura-Campo Magnético da transição supercondutora.

Anos após a descoberta da supercondutividade e de ser teorizado foram encontrados materiais SC com a capacidade de, ao invés de colapsar o estado supercondutor por campo magnético excessivo, formarem vórtices de Pares de Cooper que atravessam o material de um lado ao outro, possibilitando alguma penetração magnética do SC. Estes supercondutores, denominados de tipo 2, conseguem operar em campos magnéticos muito mais intensos (ainda que sem expulsão completa) e a temperaturas muito mais elevadas, estando o limite do praticável por volta dos 140K.

2.3.2 Interação de um supercondutor com um campo magnético

Um supercondutor funciona como um material diamagnético perfeito, isto é, sobre um campo magnético este produz um campo que permita anular o campo no interior (até certa magnitude). Como resultado da interação do campo permanente com o campo contrário induzido no SC gera-se uma força de repulsão, maior quanto maior seja o campo. Portanto, um íman terá uma repulsão por parte de um material SC que será maior quanto menor for a distância entre eles. A distribuição não linear do campo gerado por um íman permite que este seja levitado entre dois SC (Han and Kim, no date; Moon and Chang, 1994).

A resistividade nula do material SC permite que este sofra uma indução de carácter permanente por parte da mais pequena variação do campo magnético, como resultado, os efeitos de levitação eletrodinâmica (forças resultantes da interação entre um íman em movimento e materiais condutores com campos induzidos pelo movimento) que resultam em forças de arrasto em ímanes perto de condutores são anulados. Um SC do tipo 1 (sem vórtices ou penetração do campo magnético) não sofre de arrasto eletrodinâmico.

Como um SC não apresenta resistividade, uma bobine SC irá produzir o campo magnético necessário para compensar qualquer variação do campo magnético que a envolve, assim sendo, a soma da variação do campo envolvente e o campo produzido pela corrente induzida é nula. Como tal, uma bobine SC perfaz um íman permanente, isto é, mantém um nível de campo magnético fixo ao seu redor. Contudo,

sendo impossível produzir as correntes na bobine através de indução, recorre-se ao aquecimento de uma pequena porção da bobine SC e a energização da bobine através de uma diferença de potencial aplicada nessa porção. Após a geração da corrente a porção é arrefecida e a corrente no supercondutor toma então um carácter permanente.

Porém, como referido anteriormente, o campo máximo que o SC suporta é limitante das suas funcionalidades. Como tal, e porque os SC do tipo 1 apenas operam a temperaturas ínfimas (30K) e em campos diminutos, a aplicação prática é quase totalmente feita por intermédio de SC do tipo 2. A utilização dos SC do tipo 2 apresenta, no entanto, problemas de dissipação, amortecimento e histerese magnética por parte dos vórtices de pares de Cooper.

Num SC em fase 2, isto é, passado os limites do funcionamento do SC em fase 1 e a transição para a fase 2 onde existe vórtices e penetração do campo magnético, surge um efeito único, o de *flux pinning*.

O *flux pinning* é o culminar de dois resultados: a excitação de vórtices e campo magnético correspondentes são quantificados; é possível dopar o material de modo a criar zonas de maior probabilidade de formação de vórtices, e que também os fixam em posição. O efeito final é que o material supercondutor sofre uma força restauradora sempre que se tente movimentar de um ponto de equilíbrio magnético (local onde foi feita a transição supercondutora, mas também qualquer local para onde este foi forçadamente deslocado), isto porque o deslocamento relativamente ao campo magnético implicaria a criação, anulação ou deslocamento dos vórtices que, como explicado, são quantificados (ainda que em números suficientemente grandes nas aplicações normais para que possam ser tidos como tendo uma variação contínua) e estão fixos aos locais de *flux pinning*.

3 O design proposto

3.1 ISOLATOR, tipo de suspensão, metas e requerimentos do projeto

Neste projeto o intuito foi o de desenvolver uma suspensão passiva, de modo a reduzir a complexidade do sistema (não necessitando de sensores, atuadores e processadores num ambiente de vácuo e baixa temperatura no espaço), aumentando deste modo também a fiabilidade do sistema (I. Valiente, 2015).

A suspensão do projeto ISOLATOR visa o isolamento de vibrações (transmissibilidade de 0,1 (até 0,01, se possível) para vibrações de frequência superior a 30Hz). Sendo o deslocamento do objeto da suspensão limitado em torno do ponto de equilíbrio ($\pm 50\mu\text{m}$ na direção perpendicular ao plano focal e $\pm 120\mu\text{m}$ para o deslocamento no plano). A força de excitação não irá, segundo o enunciado no documento SOW, ultrapassar os 100mN.

Como referido anteriormente, a suspensão produzida será uma de levitação magnética supercondutora, pelo que será vital medir (ou calcular se possível) um valor correto do coeficiente de rigidez da levitação e o fator de amortecimento. O fator de amortecimento poderá ser incrementado pela colocação de chapas de material condutor nas redondezas da suspensão (estas irão sofrer a excitação de correntes de Eddy que irão dissipar energia por efeito de Joule).

A suspensão será então composta de um conjunto cilíndrico de ímanes permanentes solidários com a estrutura do satélite (ou suporte do telescópio) que se deslocaram no interior de um supercondutor tubular cilíndrico de raio ligeiramente superior ao do íman permanente.

O enunciado do projeto por parte da ESA contém ainda um requerimento que uma suspensão linear unidimensional passiva não consegue cumprir, é este a necessidade do sistema isolar as frequências

superiores a 30Hz, implicando um sistema pouco rígido devido a uma frequência natural pequena, e, no entanto, é pedido que, aquando da utilização do sistema em terra (na presença de gravidade), o detetor não deverá sair dos limites espaciais propostos, o que implicaria uma rigidez muito superior ao necessário para cumprir o primeiro requisito.

Estimando, pelos gráficos da transmissibilidade, que 30Hz deverá corresponder a $r=3,5$, então a frequência natural deverá ser de cerca de 8,5 Hz, pelo que, tendo em conta o peso de 12kg da massa suspensa, corresponderá a uma rigidez do sistema de suspensão de aproximadamente 34000N/m, ou numa unidade mais intuitiva no caso deste projeto, isto corresponde a 34N/mm. Como podemos constatar, esta rigidez não permite alcançar os requisitos de limitação do deslocamento para a força gravítica de aproximadamente 120N (Com aquela rigidez seria necessário cerca de 3.5 mm de deslocamento face ao ponto de equilíbrio para contrariar a gravidade, claramente mais do que os 120 μm ou 50 μm propostos como limite).

Derivado das impossibilidades apresentadas, os requerimentos foram amplamente discutidos com a ESA no intuito de os renegociar. Sendo o requisito de operação em terra descartado nas primeira instâncias.

3.1.1 A suspensão

De seguida irei fazer uma breve descrição do design e funcionamento da suspensão proposta (pelos parceiros espanhóis). Uma total e completa descrição não será possível já que a informação é considerada sensível e legalmente protegida de divulgação.

Como descrito na secção de introdução sobre suspensões supercondutoras, a resposta de um íman permanente a um campo magnético externo será a de um torque, proporcional ao campo, e uma força de translação, proporcional ao gradiente do campo magnético.

Por esta razão, e visto querer-se uma força transversal, não foi empregue um íman permanente único (que gera um campo magnético com uma distribuição relativamente uniforme) mas sim uma sucessão de ímanes com as orientações variadas (aumentando assim o gradiente do campo magnético que produzem). Na fase inicial dos testes irá ser testada qual a configuração de ímanes mais indicada.

O plano focal, como é apelidado nos documentos da ESA, correspondente à superfície aonde se vão encontrar os detetores TES (corresponde também ao plano focal do telescópio). Será suspenso por quatro braços, um conjunto de dois em cada extremidade do sistema de deteção. Em cada braço ter-se-á um sistema de levitação magnética cilíndrico, como o que estudámos e testámos. Para aumentar a rigidez do sistema a torções ao longo do seu eixo maior, os conjuntos de braços serão dispostos num ângulo reto entre eles.

Este terá uma simetria circular para facilitar o processo de design e será cilíndrico por se considerar que as forças de maior intensidade deverão ser na direção dos braços e não normais a este, já que isto corresponderia ao uma vibração de rotação do satélite.

Assim cada um destes braços terá um cilindro de ímanes permanentes solidário com a parte mais quente, em contacto com o satélite, e um cilindro supercondutor oco em envoltio sobre o íman permanente (na realidade é composto de um número reduzido de pequenos cilindros SC empilhados). Ver Figura 3.1

A distância entre a superfície SC e o íman permanente, ÍP, tem uma importância vital para o funcionamento da suspensão, já que a força de interação entre o ÍP e o SC varia bruscamente com esta distância, tomando o máximo do valor da interação quando a distância entre as superfícies for mínima. A esta necessidade de minimização da distância entre as superfícies contrapõe-se o percurso necessário para o deslocamento aceitável do sistema da FPA, as tolerâncias de produção e sobretudo as tolerâncias angulares entre o cilindro de ÍP e o tubo de SC no que toca a uma inclinação entre os eixos das duas componentes. Acrescem ainda a estas dificuldades a contração térmica dos dois materiais, que terá uma importância crucial tratando-se de um sistema com uma amplitude térmica de funcionamento tão elevada.

Para a utilização de uma suspensão supercondutora, composta de supercondutores de alta temperatura (tipo 2), é necessário que o objeto a suspender se encontre na posição de equilíbrio pretendida (no posicionamento correto do FPA) durante a transição supercondutora. Para tal, foi desenvolvido também um sistema de fixação do FPA na posição correta, apelidado de HDRM -*Hold Down Release Mechanism*. Este será, por requisito, passivo e funcionará apenas utilizando a contração térmica diferente dos materiais que o compõe. Os requisitos de precisão e repetibilidade no posicionamento do FPA irão, deste modo, recair sobre este sistema do HDRM.

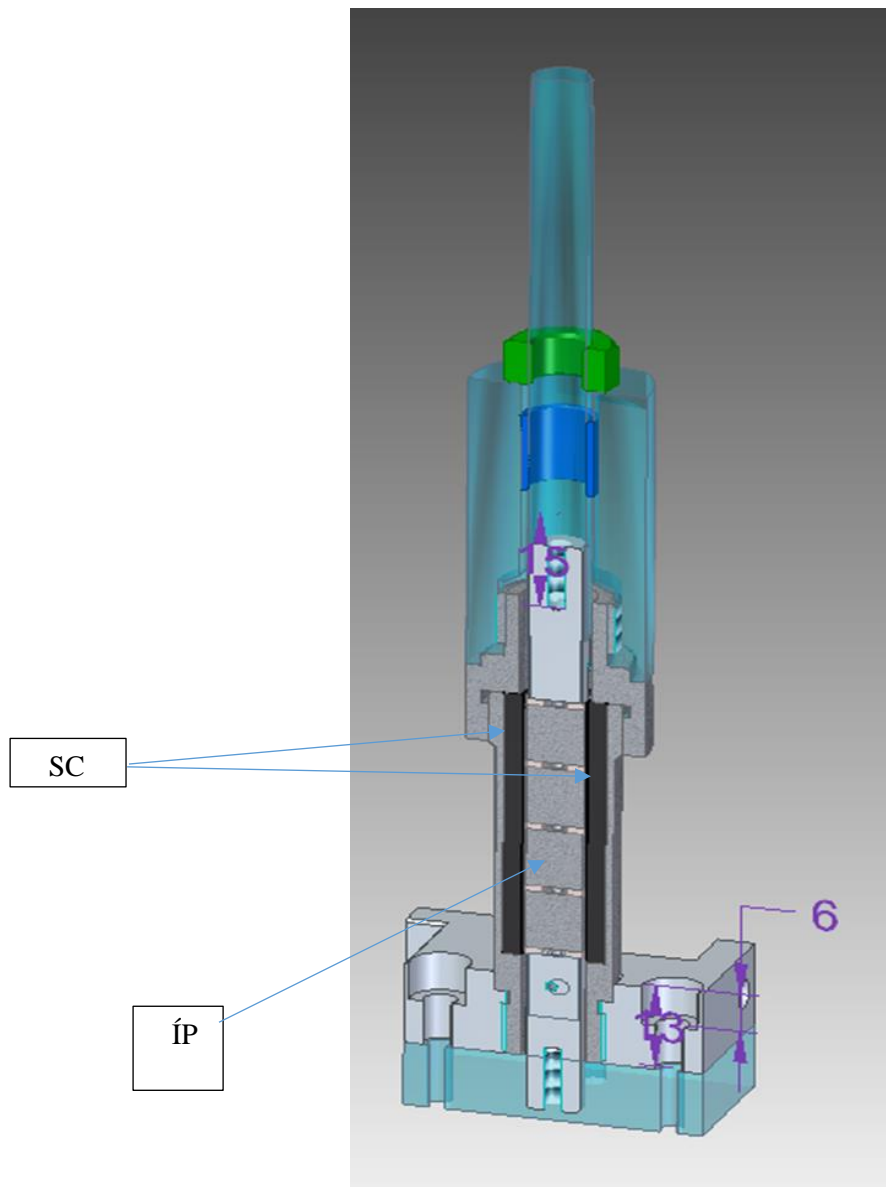


Figura 3.1 – Modelo computacional cortado da proposta de sistema de suspensão. As setas identificam o eixo central de ÍP que irá deslocar-se no interior do cilindro composto dos SC, também identificado.

3.1.2 Funcionamento e características esperadas

Espera-se que os supercondutores da montagem criem uma força restauradora, em torno de um ponto de equilíbrio, sobre o eixo de ímanes permanentes. Esta força será diretamente proporcional para deslocamentos pequenos, contudo, na aplicação mencionada o deslocamento será da mesma dimensão que o período espacial do campo magnético dos ímanes, pelo que a linearidade do sistema não será um dado garantido, isto é, a escala de variação do campo magnético é similar à escala dos deslocamentos pelo que, tendo em conta a distribuição não uniforme do campo magnético do sistema, não são descartáveis possíveis efeitos não lineares da força em relação ao deslocamento.

Calcula-se também que a movimentação e forçamento do deslocamento dos ímanes provoque uma dissipação sobre a forma de criação, difusão e aniquilação de vórtices, pelo que o sistema deverá apresentar uma resposta com histerese.

Devido a esta difusão e dispersão de vórtices, prevê-se que o sistema apresente um relaxamento, isto é, que dada uma força constante aplicada a resposta em força do sistema vá decrescendo. A resposta a longo prazo da suspensão é assim incerta e é deste modo um ponto crucial na aferição da aplicabilidade desta tecnologia. Dados publicados apontam para a estabilização do sistema após

3.1.3 Resultados dos testes feitos em Espanha e conclusões

Com vista a um teste inicial rápido do design proposto foi feita uma experiência na MAGSOAR, parceiros do projeto; aonde as características estáticas da suspensão foram analisadas para temperaturas de 77K, correspondente ao ponto de ebulição do azoto líquido.

A primeira conceção para a experiência foi a de utilizar um contentor de esferovite, aonde se colocaria a suspensão mergulhada em azoto líquido. O forçamento era efetuado colocando massas de valor conhecido no topo da estrutura e o deslocamento era medido com recurso a um distanciómetro laser (Figura 3.2). No decorrer da experiência foi necessário preencher o interior com uma espuma de esferovite para minimizar o volume a encher com azoto líquido. Um objeto maciço de cobre foi utilizado como lastro para não permitir que o enchimento de espuma de poliuretano flutuasse

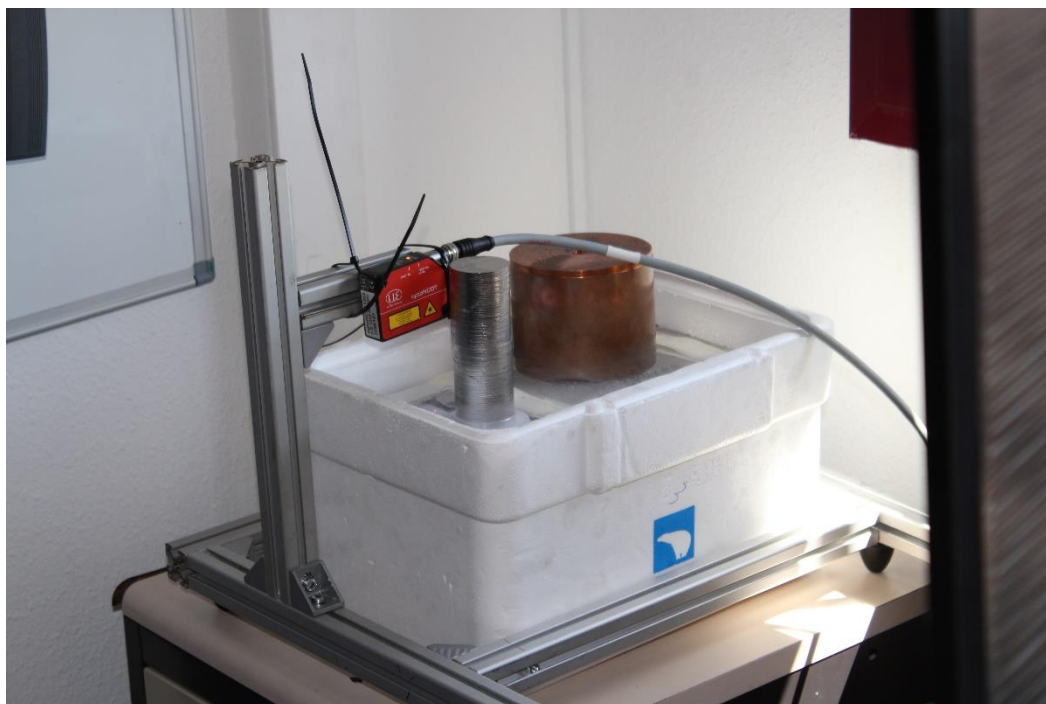


Figura 3.2 -Fotografia da primeira experiência construída na MAGSOAR S.L. A vermelho destaca-se o distanciómetro laser e ao lado pode-se ver a torre de massas utilizadas para o forçamento

A estrutura da experiência demonstrou ter baixa rigidez e repetibilidade (elasticidade da esferovite, falta de fixação das diversas componentes etc).

Somando a estas dificuldades, o posicionamento não perfeitamente concêntrico das massas aplicava um torque perpendicular ao eixo da suspensão, fazendo com que este tivesse fricção com os rolamentos do topo e/ou entre os ímanes permanentes e o supercondutor. Apontaram-se também a morosidade dos experimentos quando utilizada esta montagem e o facto do objeto a levitar girar (afetando a medição do deslocamento)

Com vista a mitigar os problemas enunciados projetou-se uma outra experiência semelhante. Nesta a suspensão é erguida com recurso a uma mesa elevatória motorizada da Thorlabs (LabJacktm) e o eixo dos ímanes é fixo a um sensor de forças (LoadCell)(Figura 3.3).

O reservatório foi feito em teflon e cercado de espuma para diminuir as perdas de calor para o ambiente.

Através de um programa de Labviewtm foi possível controlar a mesa elevatória e adquirir o sinal do sensor de força. Facilitando assim a medição de vários pontos de posição/força automaticamente.



Figura 3.3 – Estrutura da experiência final. A preto, por baixo, pode-se ver a mesa elevatória e o seu controlador (luz verde) e no topo pode-se ver o sensor de força, anexado ao tubo de plástico que transmite a força ao eixo dos Ímanes permanentes (baixa condução térmica para o sensor de força, que é sensível à temperatura).

3.1.3.1 Resultados obtidos e avaliação

O gráfico seguinte é um exemplo de um dos testes efetuados com a montagem experimental na MAGSOAR, o gráfico apresenta os dados como medidos. A cada patamar corresponde os cerca de 20 segundos em que permitimos que o sistema estabilizasse com uma massa adicionada ou retirada, o desvio padrão da componente estável de cada patamar é de cerca de $40\mu\text{m}$.

Dos pontos medidos, e conhecendo a massa aplicada (neste caso 200g) em cada instante, é possível calcular a curva de Força vs. Deslocamento.

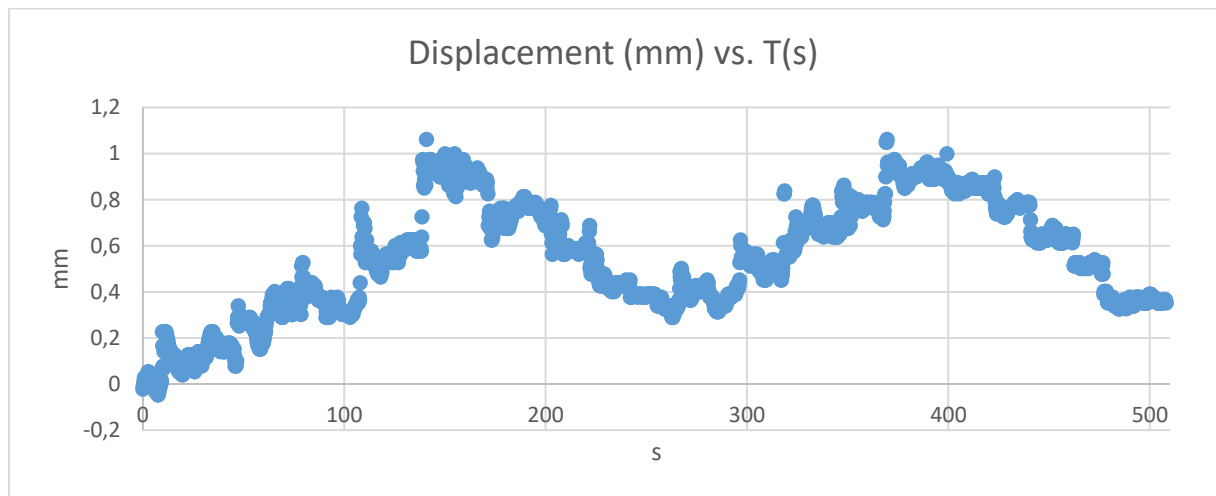


Figura 3.4 – gráfico típico dos resultados das medições efetuadas com a primeira montagem.

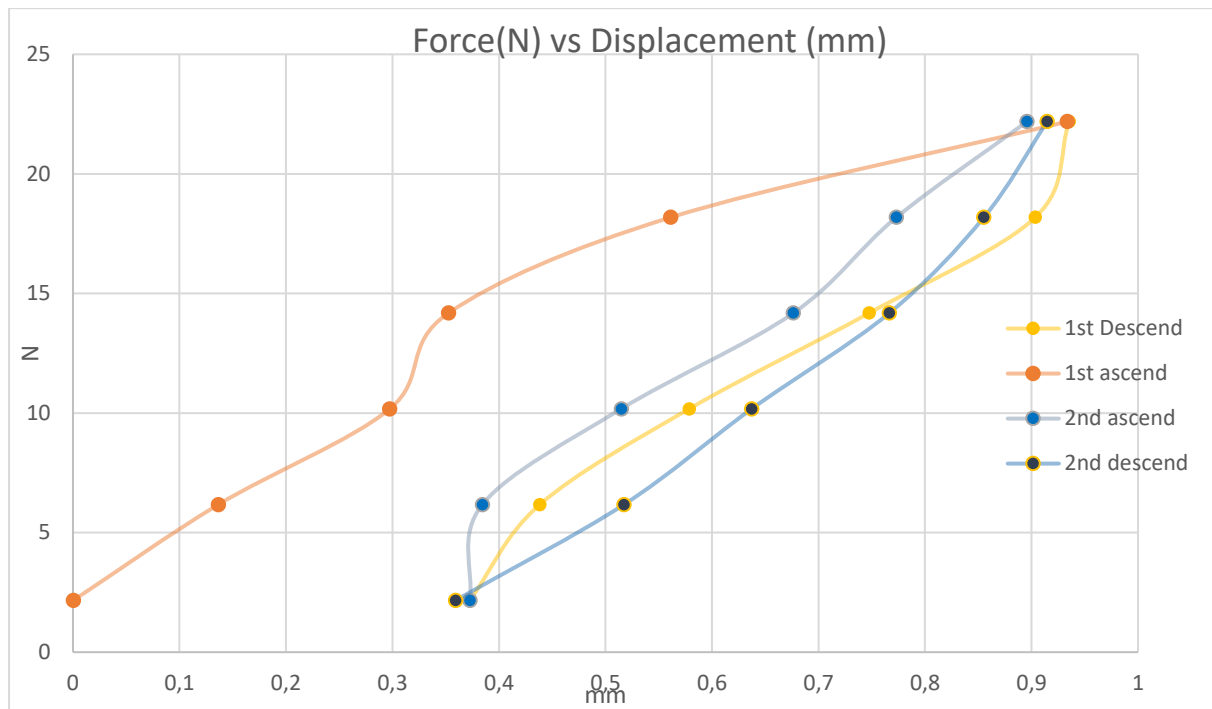


Figura 3.5 – Curvas de Força em função do deslocamento. Os ciclos foram feitos pela seguinte ordem: a vermelho - a primeira série de incremento de massa; a laranja – a primeira série de decrementos de massa; a azul escuro- a segunda série de incrementos de massa (primeira secção do segundo ciclo); a azul claro – a segunda série de decrementos de massa aplicada

A curva força vs. Deslocamento é apresentada na Figura 3.5. As linhas apresentadas servem unicamente o propósito de ilustrar o seguimento pelo qual as medições foram feitas.

Destes resultados podemos estimar uma constante elástica de cerca de 28N/mm. Podemos também reparar no afastamento que os pontos do primeiro ciclo apresentam dos outros. A diferença, de cerca de 0,4 mm para a mesma força, evidenciou-se sempre apenas entre o primeiro e os restantes ciclos, não se tratando de histerese, mas de algum fenómeno transiente, como seria a formação inicial de uma população de vórtices pela força aplicada.

Tendo em consideração os dados apresentados e outros verificados no local da experiência é possível deduzir a aplicabilidade da tecnologia (os testes de relaxamento não demonstraram um comportamento significativo após utilizações de dezenas de minutos).

3.2 Sistema de teste e caracterização

No seguimento do que foi escrito na introdução, o grupo centra-sim, *scientific and space instrumentation and modeling*, ficou com a responsabilidade da produção do sistema de teste e caracterização do protótipo produzido pelos nossos parceiros em Espanha.

Como explicado, também na introdução, vai ser importante caracterizar a rigidez do sistema para diferentes posições e temperaturas. Estes valores poderão ser medidos em testes quasi-estáticos, isto é, com a aplicação de uma força constante durante um tempo elevado relativamente à frequência natural da suspensão ou com o forçamento de um deslocamento face ao ponto de equilíbrio e a medição da força necessária para o fazer. Com este tipo de teste estático será também possível avaliar e estimar o efeito do *flux creep* (Tseng, Chiang and Chan, 2004) na estabilidade temporal do sistema de suspensão e possível deslocamento do ponto de equilíbrio com o tempo (o que corresponderá a uma mudança da rigidez do sistema final).

Será necessário também fazer ciclos de frequências bastante baixas (abaixo de 1 Hz, num sistema que deverá operar acima dos 30 Hz) de modo a caracterizar a possível histerese do sistema.

Não obstante os testes enunciados, o núcleo dos testes da suspensão será a excitação harmónica da mesma até aos 100Hz de modo a caracterizar o comportamento dinâmico e a transmissibilidade às frequências de operação do sistema final.

Todos estes testes terão de ser efetuados tanto para forças colineares com o eixo do ÍP e do SC como para forças perpendiculares a este (sendo que a estrutura usa este eixo como eixo de simetria), deste modo, e por simplicidade, foi criado um adaptador que permite montar o sistema de suspensão numa posição lateral rodada relativamente ao forçamento, podendo o sistema de teste ser assim desenvolvido para o forçamento numa direção única.

A condução térmica calculada apresenta-se ordens de grandeza inferior ao valor do limite pelo que não haverá um grande enfoque em medi-la na primeira fase do projeto. Contudo a temperatura do ÍP será avaliada o que, estando este fixo numa estrutura muito isolante, irá dar uma boa noção da transmissão real.

Estava também planeado o teste do sistema HDRM, contudo por questões de atraso este foi adiado para a segunda fase do projeto.

3.2.1 Definição dos testes

Dado comportamento previsto deverão ser feitas as seguintes experiências (esa, 2014):

- **Caracterização da curva força vs deslocamento (regime estático)** – Avaliação da resposta do sistema a diversas excitações de longo período (acima de 20 segundos), caracterização da força de repulsão e da histerese do sistema.
- **Caracterização da relaxação** – Avaliação do comportamento a longo prazo do sistema. Aplicação de uma força constante elevada e observação da variação da resposta do sistema a longo prazo (vários minutos). Os resultados obtidos aferem a aplicabilidade do sistema e por conseguinte, o futuro do projeto.
- **Caracterização do comportamento dinâmico** - Análise da resposta do sistema a excitações rápidas (resposta impulsiva). Avaliação dos tempos de resposta e do amortecimento da suspensão.
- **Forças resultantes das várias configurações de ímanes**- Aplicação dos testes referidos para montagens com pequenas variações (diferentes diâmetros dos ímanes, supercondutores, etc).

3.2.2 Critérios de aprovação

De seguida apresentam-se, sobre a forma de tabelas, os parâmetros de aceitação (a ser testados) do funcionamento dos dois sistemas: SMS e HDRM

SMS:

Tabela 3-1 Valores mínimos de aceitabilidade dos parâmetros da suspensão

Parâmetro	Descrição	Intervalo de aceitação	Valores objetivo
Transmissibilidade	Fator de transmissão da amplitude de vibração @ 100Hz (para o equivalente de uma massa de ~2kg e forças da ordem do mN).	0,1	0,01
Repetibilidade no posicionamento	Posição de repouso da massa a suspender, após 5 operações de inicialização, isto é, ciclos térmicos 300K-15K (elongação/ lateral)	$\pm 0,05\text{mm}/\pm 0,120\text{nn}$	-
Condutividade térmica	Transmissão de calor pela suspensão supercondutora(Não havendo contacto, este valor deverá ser aproximadamente nulo).	1mW	0,5mW

Sendo a repetibilidade do posicionamento proporcionada pelo sistema HDRM, este e outros testes relativos ao HDRM não serão apresentados aqui, já que, como referido, este teste foi remetido para a segunda fase do projeto.

3.2.3 Requisitos de Pressão e temperatura

Para conseguir atingir temperaturas tão baixas como 15K é necessário ter um vácuo relativamente elevado (10^{-6} mBar , é um valor comum na literatura,(Ekin, Virginia and Behrens, 1997)), isto porque a condução térmica por parte de um gás em contacto com um elemento a 17 K e em contacto com um elemento a 300K seria enorme e impraticável de compensar através de máquinas de arrefecimento razoáveis.

O nível de vácuo requerido apresenta um conjunto grande de dificuldades à produção do sistema de teste da suspensão.

Para chegar a pressões tao baixas o volume alvo terá de estar isolado e estanque, uma vez que uma fuga de pequena dimensão, aplicada de uma diferença de pressão de uma atmosfera, iria exigir um bombeamento de vácuo também ele impraticável. Este isolamento impõe um desenho das interfaces com tolerâncias mecânicas ínfimas e processos de junção isentos de fugas.

Às fugas, já de si complicadas de evitar e ainda mais de identificar e corrigir, acrescenta-se o efeito de volatilização (“outgassing”), sendo estes simplesmente os gases expelidos no interior do volume provenientes da absorção (de valor muito variado entre os materiais) dos mesmos pelos materiais, e o efeito das “fugas virtuais”, pequenos volumes de gás que são encurralados em soldaduras, roscas de parafusos e outros sítios de dimensão mínima que, pelo facto de estarem bem isolados, dificultam a evasão dos gases no seu interior.

Assim, no design de uma experiência em vácuo é necessário tomar elevada atenção aos materiais utilizados, mas também às “sujidades” que se possam depositar no interior da câmara, sendo comum a limpeza minuciosa dos objetos com álcool isopropílico (para não ter conteúdo de água. Existem possivelmente outros produtos de limpeza de objetos para preparação para vácuo, mas este foi o que utilizámos).

Assumindo a capacidade de produzir uma câmara suficientemente estanque, sem “sujidades” e sem volatilização, resta ainda, no processo do desenho da câmara, produzir uma estrutura suficientemente resistente para acomodar as forças avassaladoras, 100 kN/m^2 (o equivalente a 10 toneladas-força), resultantes da diferença de pressão entre o interior e o exterior da câmara.

Não obstante do desenho da câmara e dos materiais em si, é necessário um sistema de bombeamento de vácuo que permita evacuar a atmosfera do interior da câmara e também compensar as fugas, que são sempre o fator limitante do vácuo passível de ser atingido.

A combinação entre o volume do interior da câmara, o nível de vácuo a que pretendemos chegar, as temperaturas a que nos propusemos atingir e a massa a ser arrefecida, perfazem um sistema de criogenia de modo algum comum e, portanto, não *standard*.

Não obstante, os subsistemas apresentam dimensões ortodoxas, pelo que grande parte do desenvolvimento não necessitou de um estudo pormenorizado. Neste âmbito, tivemos a sorte de encontrar à venda, em segunda mão, uma câmara de vácuo de uma antiga evaporadora que correspondia exatamente às nossas necessidades. A bomba de vácuo primária utilizada já vinha com o conjunto e, portanto, não foi necessário dimensioná-la. A bomba turbo-molecular comprada tinha exatamente o mesmo tipo de interface que a bomba primária e, tendo a dimensão característica para câmaras deste tamanho, foi fácil de selecionar.

Já no que toca aos sensores de vácuo foi utilizado um sensor de *Penning* que o grupo já tinha, tendo este sido lido diretamente por uma placa de aquisição da National Instruments™.

Nos requisitos de atmosfera o ponto central é sem dúvida a temperatura muito baixa a que a suspensão terá de chegar.

Para chegar aos 15K do objetivo é necessário não só os ditos 10^{-6} mbar, correspondentes a alto vácuo, como também uma estrutura com condução térmica mínima e o recurso a um escudo de radiação.

O desenho de um sistema de teste de uma suspensão que irá operar a 100Hz com forças estimadas de 400N já é de si complicado, já que pressupõe uma rigidez estrutural elevada. O problema é severamente agravado quando o teste é destinado a temperaturas criogénicas, isto porque a utilização de estruturas mais grossas se torna impossível pelo aumento da condução térmica.

No desenho de estruturas rígidas de baixa condução térmica recorreremos a um material já usado pelo grupo, o ISOVAL™, uma fibra de vidro reforçada por uma epóxi especial, operável em vácuo. Este material tem características extraordinárias a nível de rigidez, forças máximas e condução térmica.

Assim sendo, a suspensão foi isolada do resto do sistema que opera à temperatura ambiente por duas estruturas paralelepípedicas (por nós chamadas de torres) ocas de ISOVAL, uma por cima e uma por baixo. Estes paralelepípedos tiveram grande parte da sua área lateral reduzida por maquinação de modo a reduzir a condução térmica.

A contração da estrutura foi simulada utilizando os melhores dados a que tivemos acesso para a contração térmica do material a baixas temperaturas (Marquardt, Le and Radebaugh, no date), e os resultados encontraram-se em concordância até quase o terceiro algarismo significativo.

Foi simulado que seria necessário cerca de 0,6W de arrefecimento só para contrariar a condução térmica das torres (“paralelepípedos”).

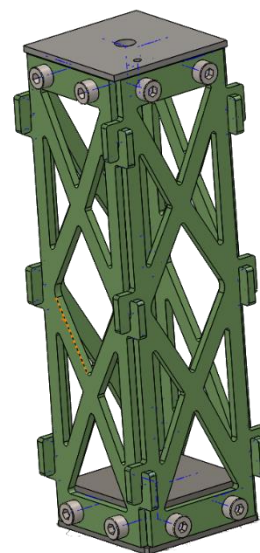


Figura 3.6 – “torre” de ISOVAL, rigidez elevada com baixa condução térmica

3.2.4 Requisitos de dinâmica

Em grande parte, os requisitos dos testes são de origem mecânica, já que se pretende testar a capacidade de isolamento de vibração até aos 100Hz.

Ainda que o instrumento final seja concebido para oscilações de amplitude muito diminuta, cerca de $0,1\mu\text{m}$, por limitação dos sistemas de forçamento e de medição a amplitude de teste terá de ser bastante superior a este valor.

As frequências e amplitudes estipuladas, em cooperação com as outras instituições, correspondem a movimentos harmónicos de amplitude de aproximadamente 1mm. Esta amplitude estabelece uma velocidade e aceleração máxima de, respetivamente, $0,628\text{ m/s}$ e $394\text{ m/s}^2@100\text{Hz}$, $A=1\text{mm}$.

A dimensão da força necessária para impor esta amplitude poderá ser elevada, estimou-se que não seriam necessários mais do que 400N de força máxima (pico de aceleração).

As características mínimas que nos foram transmitidas, referentes à suspensão magnética, apresentam-se nas tabelas seguintes

SMS (Superconducting Magnetic Suspension):

Tabela 3-2- Tabela das condições impostas ao desenho da experiência de teste da suspensão supercondutora.

Volume livre no interior	300mm x 260 mm de área 300mm de altura	Espaço reservado para a suspensão produzida pela MAGSOAR e a Universidade de Alcalá
Geração de vibrações	1 mm > Amplitude >0,01 mm. frequências até 100 Hz. forças até 400 N	O processo será repetido para temperaturas entre os 70K e os 15K, tendo como resultado as curvas de transmissibilidade do sistema

4 Desenvolvimento do sistema de teste

4.1 Conceito final

O conceito do sistema de teste da suspensão, como pensado e proposto pela, e para, a ESA consiste na recriação o mais realista possível do ambiente de operação da suspensão no espaço. Como tal, esta conceção pressupõe a operação do HDRM, para o arrefecimento da suspensão com a massa suspensa na posição correta, a ativação térmica da suspensão supercondutora e a desativação térmica do HDRM. Por fim, dar-se-á o forçamento do sistema e medição da vibração resultante.

Este teste tem, contudo, algumas dificuldades técnicas inerentes que não se justificam para uma primeira prova-de-conceito. São algumas delas a instabilidade da massa na utilização de apenas um braço da suspensão (não é comedido produzir logo os quatro braços da suspensão quando estes ainda têm parâmetros a otimizar e são feitos de titânio, SC e ÍP caros), o inevitável arrefecimento de uma massa de 12kg a 15K (algo quase inconcebível para uma fase inicial de um projeto desta dimensão, especialmente numa fase inicial que requer várias experiências), uma estrutura forte o suficiente para oscilar 12kg a 100Hz, um sistema de excitar a vibração da massa sem comprometer a suspensão da mesma, como arrefecer uma massa sem comprometer a suspensão livre da mesma etc.

Assim sendo, a experiência que se avançou para a primeira fase difere da utilização final do sistema integral, mas irá produzir a informação necessária para cumprir a primeira fase dos testes e completar a prova de conceito.

4.2 Conceito para a 1ª fase

Como descrito no ponto anterior, a conceção da experiência para a primeira fase difere um pouco da experiência final.

Ao invés de se forçar a oscilação de uma massa suspensa, iremos comprimir e distender a suspensão (correspondente a um dos quatro braços idênticos) mantendo o segmento do SC fixo e forçando a oscilação do ÍP. vários testes irão permitir a informação necessária para se poder simular com uma certeza acrescida a dinâmica do sistema suspenso.

Não havendo massa solta (com exceção da massa do ÍP que veremos posteriormente apresentar-se como uma inércia mássica nas medições) a transferência de energia para uma oscilação ressonante não se dá, e, portanto, a amplitude será a que se pretender, facilitando a obtenção de informação mais clara para a otimização da suspensão.

Uma noção importante é a de que não havendo ressonância mecânica (tirando a massa reduzida do ÍP) a força exercida nos dois extremos da suspensão será igual, se assumirmos a não dissipação das forças magnéticas nos objetos estranhos ao sistema de suspensão.

Assim, o sistema de teste terá de ser constituído de uma estrutura que permita a compressão de um objeto no interior de vácuo, a temperaturas criogénicas, mantendo sempre um volume atribuído para a suspensão desenhada pelo grupo de Espanha.

Esta estrutura terá de ser extremamente rígida já que não poderá ter modos de oscilação com frequências de ressonância perto ou abaixo dos 100Hz, mas, no entanto, terá de apresentar uma condução térmica relativamente ínfima (um total de condução inferior a 0,5W, para um objeto que se encontra a 15K e no qual serão exercidas forças de 400N). Esta estrutura terá também de contrariar qualquer força

residual que tenda a dobrar ou torcer a suspensão (sendo a força aplicada de 400N as forças relacionadas com desalinhamentos, vibrações etc, deverão ser pelo menos da ordem das dezenas de Newtons).

4.2.1 Esquemas

4.2.1.1 Teste SMS

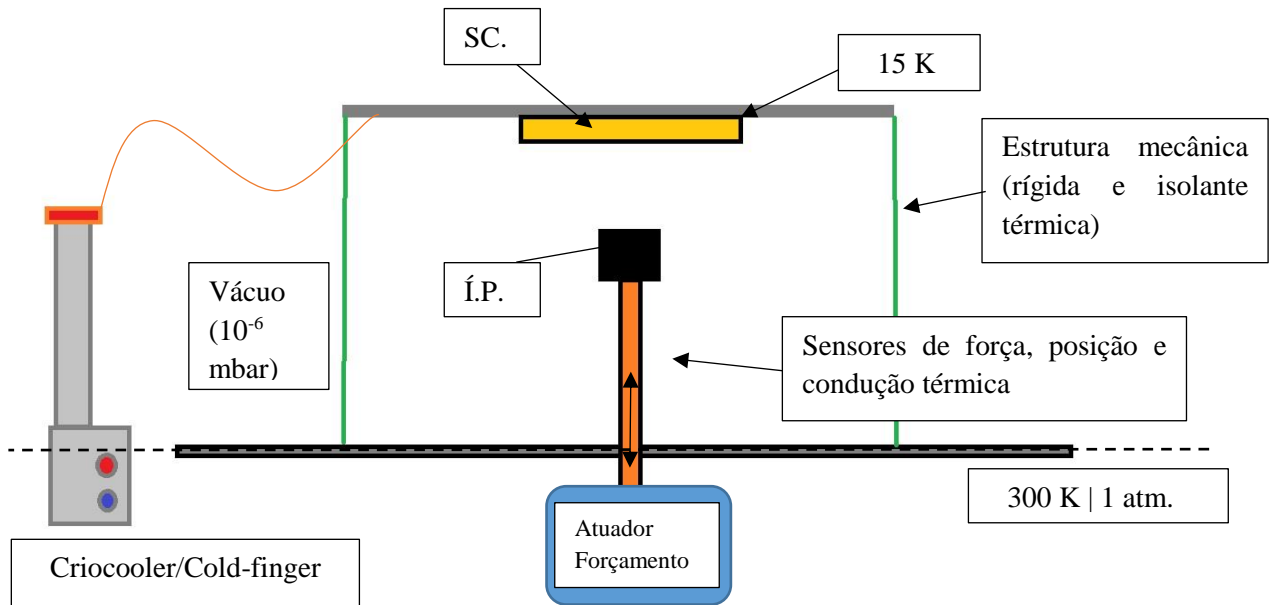


Figura 4.1 Esquema ilustrativo do sistema de caracterização da suspensão supercondutora.

Na Figura 4.1, encontra-se ilustrado o esquema da experiência. De lado pode se ver já uma referência ao sistema de arrefecimento, aqui representado pelo dedo-frio e as tranças de cobre para conduzir a temperatura (curva a laranja), que será descrito em maior detalhe no decorrer deste documento. Está patente também nesta figura, através de uma caixa de texto no canto inferior direito, a informação de que toda esta experiência será montada no interior de uma câmara de vácuo e que esta estará à temperatura ambiente.

4.2.2 Estrutura hexapod

Por estas razões o primeiro *design* proposto corresponderia à fixação do SC numa placa de aço (rígida e, portanto, algo pesada) alicerçada num sistema denominado de hexapod - utilização de seis braços cujas inserções nas duas superfícies a fixar coincidem com as inserções de um dos outros braços. A utilização de um ponto de inserção para dois braços diferentes com um ângulo entre eles permite criar uma estrutura aonde as forças aplicadas sobre os braços são somente de compressão e distensão e não de torção, minimizando as dimensões características da estrutura e, deste modo, o peso e condução térmica(Figura 4.2).

Os braços poderiam ser deste modo produzidos no material ISOVALtm introduzido anteriormente que apresenta parâmetros mecânicos para a compressão superiores a quase a totalidade dos materiais disponíveis. Esta estrutura teria de isolar a placa de aço a 15K para valores de 0,5W, utilizando seis braços de apenas 15cm e que, mais uma vez, teriam de suportar forças da ordem da centena de Newtons. O resultado da simulação térmica foi de uma condução total de 0,26W(Figura 4.3).

Outra dificuldade inerente a esta experiência em específico é a necessidade da total ausência de vibrações da estrutura, por outro lado, a expansão e contração térmica da placa superior na extrema flutuação térmica leva a que não se possa desprezar estes efeitos na variação no ângulo dos braços do hexapod (Figura 4.4). Não podendo utilizar rolamentos convencionais, e tratando-se de uma pequena mudança de ângulo estudou-se a utilização de rolamentos sólidos, isto é, a simples deflexão elástica do material.

Todas as simulações que fiz no âmbito desta estrutura foram efetuadas pelo software de, entre outras funcionalidades, elementos finitos SOLIDWORKStm.

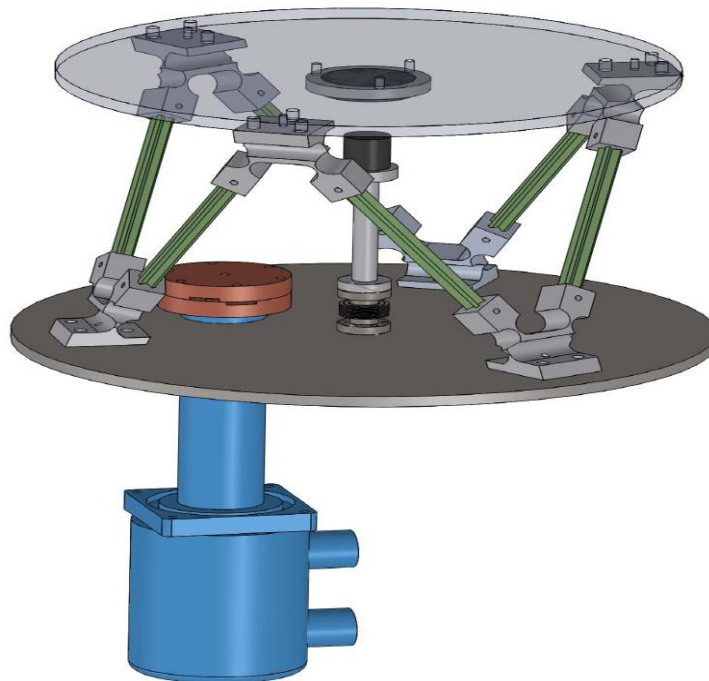


Figura 4.2 Modelo computacional da primeira proposta de estrutura para o equipamento de testes. A imagem já contém elementos não estruturais: o dedo-frio a azul; o veio central correspondente ao eixo utilizado para a excitação das vibrações e o SC fixo no centro da placa do topo

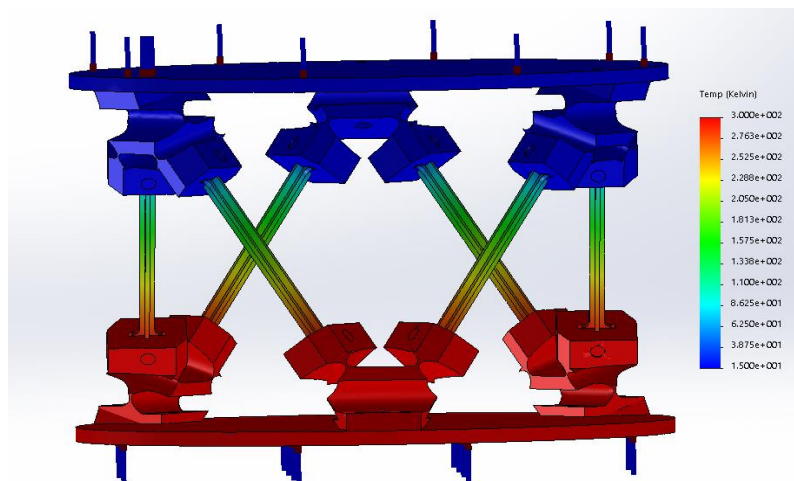


Figura 4.3 simulação térmica da estrutura por elementos finitos através do software *SOLIDWORKSsm* : aplicação de uma temperatura fixa de 15K na placa superior e de 300K na placa inferior. Os resultados apontam para 0,26W de condução. O gradiente de cor, correspondente ao gradiente da temperatura nos braços ilustra o isolamento térmico promovido pelos braços. Para as simulações térmicas foi necessário ter em conta as propriedades dos materiais para baixas temperaturas, este estudo foi feito e apresenta-se no apêndice A.

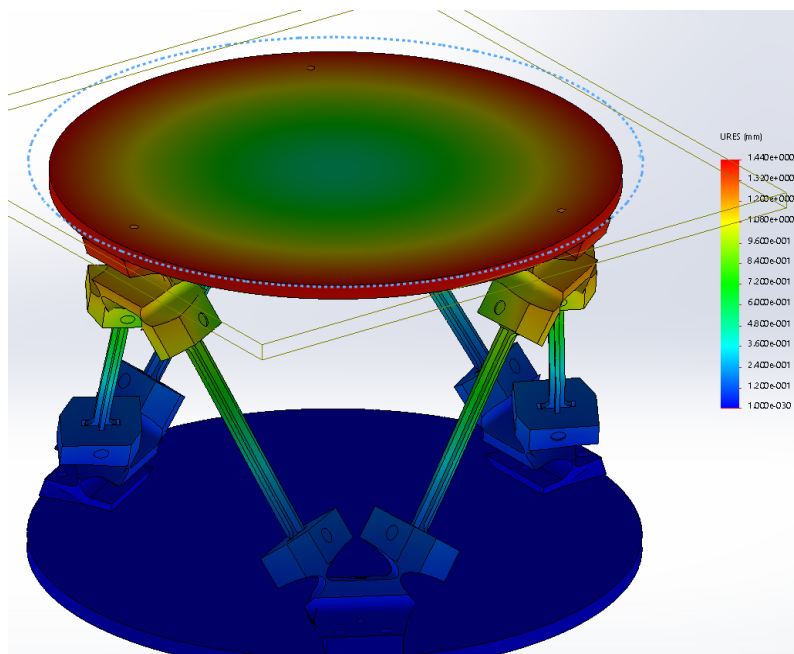


Figura 4.4 Resultados da simulação de contração utilizando os dados de temperatura provenientes da simulação apresentada na Figura 4.3, relativos à contração térmica. A legenda apresenta-se de modo pouco legível, o limite superior é de 1,4mm e o inferior o valor nulo. Assim vemos que o tabuleiro superior contrairia cerca de 1.4 mm em raio.

4.2.3 Estrutura utilizada

No final, devido às questões apresentadas no início deste capítulo, optou-se por colocar o SC também num veio, como se propunha fazer com o ÍP. Deste modo a placa superior pôde ser mais afastada para cima e, como o isolamento térmico passou a ser produzido pelo veio, a estrutura pôde ser construída integralmente em aço, facilitando em parte as dificuldades de rigidez.

No decorrer da experiência, esta estrutura foi alterada por um tripé produzido em alumínio pelos parceiros espanhóis com o intuito de garantir uma rigidez não apenas capaz de aguentar as forças propostas, mas sim também de não apresentar modos de vibração de frequência inferior aos 150Hz.



Figura 4.5 Fotografia da montagem experimental numa fase avançada. Ainda sem o escudo de radiação térmica. Pode-se ver as duas torres em ISOVAL™, verdes, e a estrutura em tripé fornecida pelos parceiros espanhóis. Pela fotografia torna-se clara a dificuldade em lidar

Participei diretamente no desenho da primeira proposta, hexapod, e nas produções das simulações associadas. Mantive uma contribuição continuada na discussão do desenvolvimento e desenho da estrutura adoptada, assim como as implicações que esta teria na distribuição dos vários instrumentos da experiência, sendo, no entanto, a responsabilidade final sobre a produção desta da parte do então recente colega Diogo Rodrigues.

4.3 Sistema de Vácuo

Como explicado na secção 3.2.3, para atingirmos a baixa convecção necessária para atingir os 15 K é necessário proporcionar um ambiente de vácuo quase perfeito em redor do objeto a arrefecer. Já explicadas as dificuldades da produção de um contentor que permita vedar este nível de vácuo irei fazer uma introdução às tecnologias necessárias para atingir este tipo de atmosfera. Mantendo em mente que o nível de vácuo requerido é da ordem dos 10^{-6} mBar.

Para obter o vácuo é necessário forçar a evacuação dos gases do interior da câmara, impor uma velocidade do interior para o exterior, para tal será utilizado um sistema de bombeamento.

Os diferentes tipos de sistema de bombeamento operam por métodos dissemelhantes, contudo, alguns princípios emergem que se aplicam a todos esses métodos.

Numa atmosfera comum existe pressão e a geração de um gradiente da mesma através da redução da pressão num local promove a aceleração, neste caso, do gás. É esta aceleração por parte de diferenças de pressão que se pretende usufruir nas bombas de vácuo por compressão.

Os princípios e cálculos da Termodinâmica permitem chegar à conclusão que o diminuir de pressão está associado à minoração da entropia, pelo que, pelos princípios da termodinâmica, um reservatório de entropia terá de ser providenciado assim como energia para colmatar a ineficiência inerente ao processo de compressão. Em suma, é necessário providenciar energia para que as partículas de um gás ou líquido se possam dirigir de um meio com pressão inferior para um de pressão superior.

Os sistemas de bombeamento correspondem essencialmente a métodos de providenciar a energia necessária a este processo, assim como o momento necessário para o movimento associado ao transporte para o exterior do volume.

A expansão de um volume de gás permite baixar a pressão, pelo que associar o volume da câmara a um reservatório auxiliar que foi expandido permitiria baixar a pressão (e concentração) no interior da câmara. Este processo funcionaria bem para obter uma diminuição de pressão, mas nunca com o objetivo de obter alto vácuo. A concentração pretendida é tão ínfima que este processo implicaria um volume de expansão impraticável (10^9 do volume da câmara). Assim sendo, um processo de evacuação continuado para o reservatório auxiliar e deste para a atmosfera torna-se imperativo.

Como descrito no penúltimo parágrafo, é necessário aumentar a pressão no interior do reservatório auxiliar para que o gás no seu interior flua para a atmosfera (nosso reservatório de entropia e gás). Teoricamente seria possível conceber um compressor que pudesse comprimir um fluxo de gás continuamente para este ser expelido, no entanto, este tipo de bombeamento não é praticável quando a diferença de pressão entre as extremidades do compressor são elevadas ($> 0,2 \text{ Bar} \approx 20 \text{ kPa}$) e os fluxos pequenos. Esta dificuldade aumenta quando se pretende atingir os limites de aplicação da mecânica de fluídos newtoniana.

Neste âmbito as bombas de baixo vácuo (assume-se mecânica de fluídos Newtoniana) compreendem sempre a ideia de acolher um volume pequeno do interior da câmara, isolá-lo da câmara, comprimi-lo e só depois expeli-lo para a atmosfera, isto é, o processo dá-se de modo cíclico para volumes pequenos isolados. A questão técnica constitui apenas a forma de adquirir o volume, isolá-lo e comprimi-lo de forma cíclica.

O modo mais comum é o empregue por uma bomba rotatória:

- circular duas chapas complanares retangulares finas no interior de um cilindro (a distância entre as duas é estanque pelo eixo que segura as duas chapas).
- O cilindro tem uma saída para a atmosfera na parede lateral e uma entrada para a câmara de vácuo num local adjacente da mesma parede.
- O eixo de simetria do cilindro é paralelo ao plano das chapas, mas não coincidente.
- As chapas rodam no interior do cilindro, mantendo os dois sub-volumes do cilindro que gera isolados (os lados da chapa estão todos em contacto com a parede do cilindro).
- Rodando o plano das chapas em torno de um eixo não concêntrico com o eixo do cilindro, e permitindo um movimento de afastamento das chapas para que estas mantenham o contacto com a superfície do cilindro, os volumes por elas enclausurados variam de volume no decorrer da rotação, assim promovendo a compressão do gás e garantindo que não há um contacto direto entre a câmara e a atmosfera.
- A repetição cíclica do processo evacua os gases do interior da câmara.

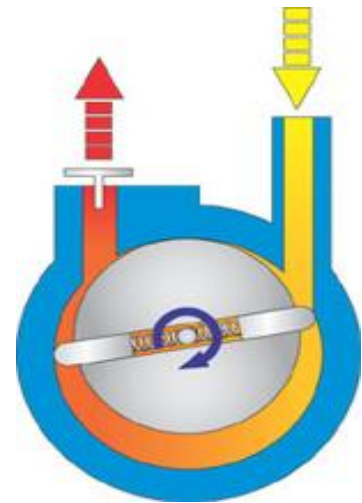


Figura 4.6 Esquema ilustrativo do funcionamento de uma bomba rotatória.

Pode-se ver representado o ar proveniente da câmara (amarelo) que será isolado no volume inferior do cilindro e que será comprimido para sua expulsão (vermelho).

Estas máquinas são capazes de produzir vácuos da ordem dos 10^{-6} mBar. O vácuo atingido é limitado pela taxa de compressão, volume à saída/ volume proveniente da câmara, e pelas fugas que existam em todo o sistema (fugas da zona de pressão elevada para o interior da câmara de vácuo). A grande taxa de compressão necessária para aumentar a pressão do volume proveniente da câmara em 10^{13} vezes, também na ordem de 10^{13} , faz com que o volume evacuado seja pequeno, assim, uma bomba que seja otimizada para evacuar uma grande quantidade de gás a pressões relativamente grandes não será ótima para atingir vácuo elevado, e vice-versa.

Esta tecnologia peca ainda pela necessidade da utilização de óleo para produzir um selo entre a superfície do cilindro e das chapas.

As outras tecnologias de bombeamento de baixo vácuo, também conhecido por vácuo primário por razões que serão apresentadas, utilizam geometrias circulares não concêntricas ou não simétricas, de reciprocção (pistões) e com métodos de isolamento dos gases no interior com base na geometria do movimento, em líquidos ou com diafragmas.

Nos limites de bombeamento destes equipamentos em que os fluxos de fugas (aqui generalizando para passagem de ar pela bomba, superfícies etc) se igualam aos fluxos bombeados o vácuo é tal que a mecânica de fluídos newtoniana já não se aplica e passa-se ao regime balístico. Neste regime já não há viscosidade e portanto não se consegue produzir um incremento no bombeamento baixando a pressão numa pequena entrada. Os tempos de bombeamento tendem a aumentar e é necessário bombear as partículas do interior transferindo-lhes momento diretamente na partícula.

Sendo as bombas anteriormente descritas ineficientes neste regime criaram-se assim as bombas de transferência de momento. Estas tecnologias permitem atingir vácuos superiores, mas são incapazes de funcionar à pressão atmosférica e, portanto, elas utilizam-se em série com bombas de baixo vácuo. Nasce assim a terminologia de bombas primárias, que geram vácuo primário, ou seja fraco e as bombas secundárias que arrancam neste ambiente e permitem atingir vácuo secundário mais elevado.

As tecnologias que produzem fluxos relativamente elevados eficientemente, quer em potência como em volume, custo etc são as de difusão e as turbomoleculares.

As bombas de difusão funcionam pela aceleração de um jato de gás através de uma da câmara da bomba e posterior condensação formando assim um ciclo de aquecimento e evaporação, aceleração, arrefecimento e condensação. As moléculas do interior da câmara de vácuo são celeradas por difusão do momento das partículas do óleo evaporadas pela bomba. Estas bombas possibilitam vácuos de 10^{-9} mBar e apresentam como principal desvantagem a contaminação da câmara de vácuo por partículas de óleo.

As bombas turbomoleculares são bombas turbo, ou seja, utilizam a rotação de um conjunto de pás a uma velocidade muito elevada ($\sim 50000\text{rpm}$) para bombear o gás. O desenho e inclinação das pás promove uma transferência grande de momento às partículas da câmara, acelerando-as para a entrada da bomba primária (promovendo o aumento da pressão quando estas impactam com as superfícies dos tubos e da bomba primária, conseguindo esta bombear o volume que lhe é dirigido).



Figura 4.7 – corte de uma bomba turbomolecular. Na parte superior pode-se ver o conjunto de pás que promovem a aceleração das partículas. Na parte inferior temos os rolamentos magnéticos e o motor elétrico responsável pela rotação.

Por fim existem um conjunto de sistemas de bombeamento de ultra alto vácuo denominados de bombas de armadilha ou captura (tive dificuldade em encontrar uma tradução fidedigna). Estas utilizam métodos para conter os resquícios de partículas alheias na câmara. Os tipos mais recorrentes são a armadilha de criogenia (condensação dos gases numa superfície a temperaturas criogénicas), armadilha por ionização e deposição, formação de produtos de reação sólidos, materiais que absorvem quando aquecidos. Estes métodos permitem atingir vácuos muitíssimo elevados, mas, não tendo um funcionamento cíclico, não permitem evacuar volumes significativos de gás.

No nosso projeto utilizámos um sistema de bombeamento de vácuo composto de uma primária rotatória e uma turbomolecular. A rotatória já vinha com a câmara de vácuo que comprámos em segunda mão e, portanto, já vinha otimizada para o volume da câmara. Contudo o sistema que vinha com a câmara era de difusão e essa tecnologia não se apresentava como alternativa viável já que o interior da câmara não podia ser contaminado.

Após alguns dias de testes e correções (troca de algumas borrachas O-ring e remontagem de flanges) conseguimos chegar ao vácuo de 10^{-6} mBar. O vácuo primário é atingido três a cinco horas após o começo do bombeamento e um vácuo de 10^{-5} é atingido em cerca de uma hora. Após iniciar a turbomolecular, a passagem de 10^{-5} mBar para 10^{-6} mBar e até 10^{-7} mBar em algumas ocasiões só se dá a partir de dez, quinze horas. Sendo o interior da câmara repleto de materiais e superfícies é natural que o tempo de volatilização seja elevado, havendo também um número elevado de interfaces mecânicas de dimensões relativamente elevadas que possibilitam fugas, resultando neste tempo de bombeamento de alto-vácuo.

Por estarmos limitados em materiais e tempo para começar os testes de vácuo, utilizámos uma válvula de ventilação em parte improvisada (foi necessário diminuir o diâmetro da saída da válvula) e não foi construído um sistema completo de válvulas. Assim, a turbomolecular foi diretamente conectada à bomba primária não havendo válvula para fechar o fluxo em nenhuma parte do circuito. A possibilidade de isolar a câmara do sistema de bombeamento teria ajudado na deteção e avaliação de fugas e permitiria desligar o sistema de bombeamento nas interrupções dos testes do sistema.

No que toca à medição do nível vácuo existem, também, enumeras tecnologias. Todas elas partem de um tipo de interação com as moléculas no interior do sensor. Para baixo vácuo é comum os sensores corresponderem apenas à medição da deformação mecânica causada pela diferença de pressão. Existem sensores que utilizam a condução térmica do gás residual e sensores utilizam a excitação eletrónica dos átomos presentes.

No caso do nosso projeto, porque já tínhamos os sensores, utilizámos um sensor *Piranni* para o baixo vácuo, que funciona pela medição da temperatura de um filamento aquecido que varia com a condução providenciada pela atmosfera existente, e para o alto vácuo utilizamos um *cold-cathode gauge*, este, corresponde a uma fonte de eletrões que se deslocam num confinamento magnético e que excitam iões dos gases presentes, a corrente elétrica derivada da existência destes iões é medida e produz um sinal significativo da pressão existente.

Independentemente dos sensores utilizados as incertezas relativas são muito superiores aos outros tipos de sensores, não sendo incomum sensores com incertezas relativas de 50%.

Para que o nosso sistema de vácuo funcionasse foi preciso instalar tubagens de evacuação dos gases (que muitas vezes vêm contaminados de óleo), reparar as conceções elétricas do motor da bomba primária, fazer as instalações de cabos elétricos, montar as tubagens de vácuo entre os vários sistemas, instalar e tornar operacional o controlador da turbomolecular, fazer o fornecimento elétrico do sensor de vácuo, fazer a aquisição do sinal do sensor de vácuo por parte de uma placa de aquisição da National Instrumentstm,

4.4 Sistema de Criogenia

Os sistemas de criogenia são sistemas que permitem extrair calor de objetos que estão a temperaturas criogénicas (abaixo do ponto de liquefação do azoto, 77K). São sistemas de arrefecimento que recebem a dificuldade funcional de trabalharem com diferenças de temperatura elevadas (de 300K para a temperatura de arrefecimento) e a temperaturas tão baixas que poucos compostos se mantêm líquidos.

Também nesta área existem uma variedade de paradigmas de produzir o arrefecimento, todos eles são afetados pelos resultados da termodinâmica e pelos limites de eficiência impostos pelos ciclos de Carnot. A segunda lei da termodinâmica garante que um gás não baixa a sua temperatura espontaneamente. Para a baixar, é necessário providenciar um reservatório de entropia. Como corolário da lei, qualquer mecanismo de arrefecimento terá sempre de conter um reservatório de entropia para além do objeto a arrefecer e terá que ser sempre injetada energia no sistema de modo a, no mínimo, compensar as diferenças de entropias resultantes do arrefecimento, transmitindo-as para o reservatório de entropia.

A diferença de entropias resultantes das diferenças de temperatura entre o objeto do arrefecimento e o reservatório de calor provocam uma eficiência energética necessariamente imperfeita.

Em praticamente todos os sistemas de arrefecimento, e em especial aqueles de que se pretenda potências relativamente elevadas, procede-se à manipulação cíclica da pressão, volume e temperatura de um gás. Comprimir o gás aumenta a temperatura e permite assim expelir entropia na forma de calor para o reservatório, a posterior expansão permitirá baixar a temperatura e retirar calor do objeto a arrefecer. Todos os sistemas de arrefecimento necessitam, deste modo, de isolar o contato térmico entre o reservatório de calor e a peça a arrefecer, seja por intermédio de válvulas, movimentação de êmbolos etc(já que a condução direta constitui uma fonte de ineficiência).

Para ajudar o funcionamento destes sistemas é comum existir o chamado regenerador, elemento que permite a passagem do fluído, mas que impõe uma variação térmica do mesmo. Este elemento mantém o seu funcionamento ciclicamente e a sua operação é potenciada pelas diversas partes dos ciclos de arrefecimento e aquecimento. Idealmente um regenerador terá uma impedância nula ao movimento do fluído e terá uma condução térmica nula entre os extremos que se apresentam a temperaturas diferentes.

4.4.1 Cryocooler Gifford-McMahon

No nosso projeto utilizamos um sistema apelidado de Gifford-McMahon, este divide-se entre um compressor e um expansor. O Compressor é apenas um sistema de compressão e arrefecimento do gás de hélio que mantém dois depósitos, um de baixa pressão e outro de alta pressão (ambos os depósitos se encontram perto dos 17 Bar), a uma pressão constante. O circuito é fechado, pelo o que o compressor faz é receber gás a baixa pressão do expansor e comprimi-lo para o depósito de alta pressão.

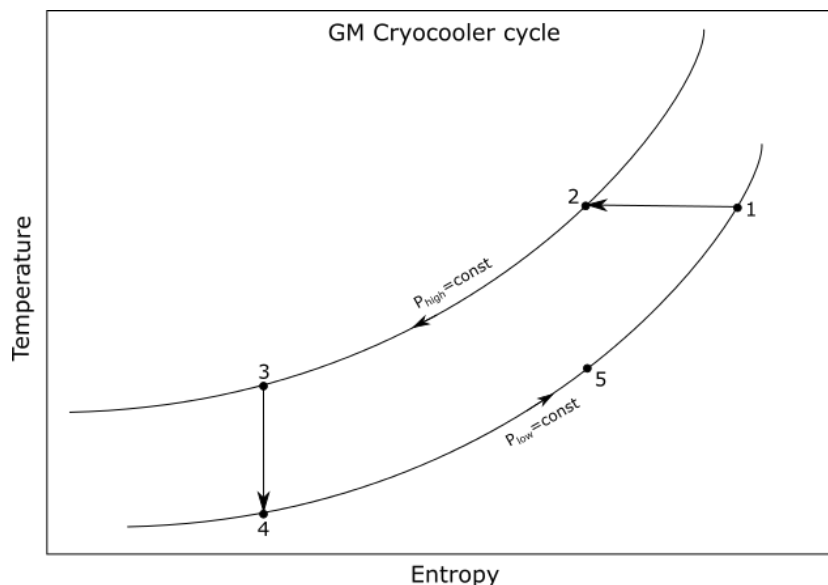


Figura 4.8

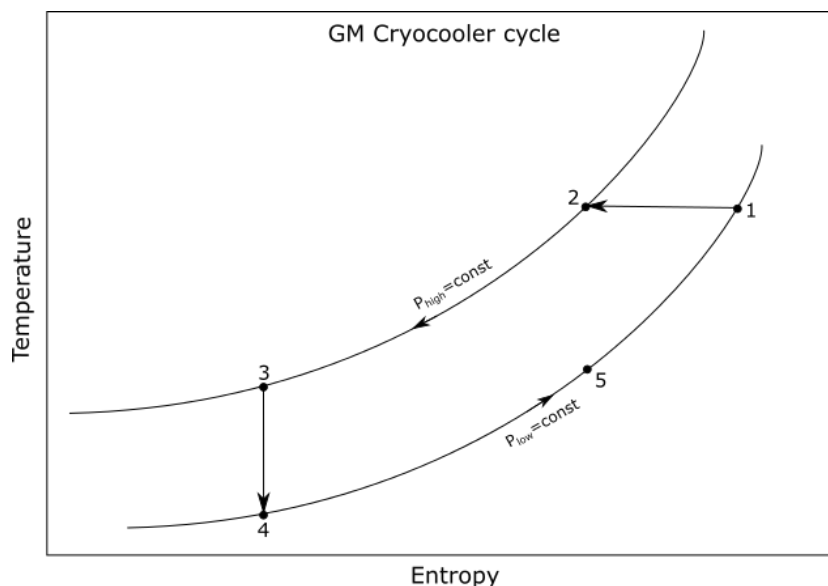


Figura 4.8 - gráfico de temperatura vs. entropia para um ciclo de Gifford-McMahon. Pelos números e setas pode-se compreender a direção do ciclo de operação de um expansor deste tipo.

A implementação deste ciclo do ponto de vista mecânico não é única, pelo que passarei a apresentar a mais simples/comum (não consegui encontrar uma referência quanto à implementação mecânica do nosso dedo-frio, nome dado ao expansor).

O dedo-frio é composto, rudemente posto, por uma câmara cilíndrica, um pistão cilíndrico concêntrico e uma válvula circular que periodicamente transita entre a ligação de alta pressão e a de baixa pressão. O pistão contém não só uma superfície que permite impedir a passagem do hélio, mas também o regenerador.

O deslocamento do pistão no interior do cilindro, cuja ponta consiste na interface de arrefecimento, e as mudanças de pressão constituem a totalidade do método de funcionamento do expansor.

Para começar, o pistão é encostado à ponta fria, geometricamente oposta à válvula que controla a pressão. A válvula conecta a tubagem de alta pressão ao sistema e, assim, o interior mais próximo da

válvula fica à temperatura ambiente e a alta pressão. Ao puxar de seguida o pistão, que permite a passagem de uma pequena quantidade de fluido pela sua periferia, o ar é forçado a deslocar-se para o lado de baixa temperatura, chegando lá a uma temperatura inferior pelo facto de ser arrefecido pelo regenerador que se desloca solidariamente com o pistão.

Ao trocar a válvula para a baixa pressão, o ar que se encontrava no lado oposto do pistão expandir-se-à e arrefecerá no processo. O ciclo é depois concluído pelo deslocamento do pistão de novo para a ponta fira da câmara, arrefecendo também assim o regenerador.

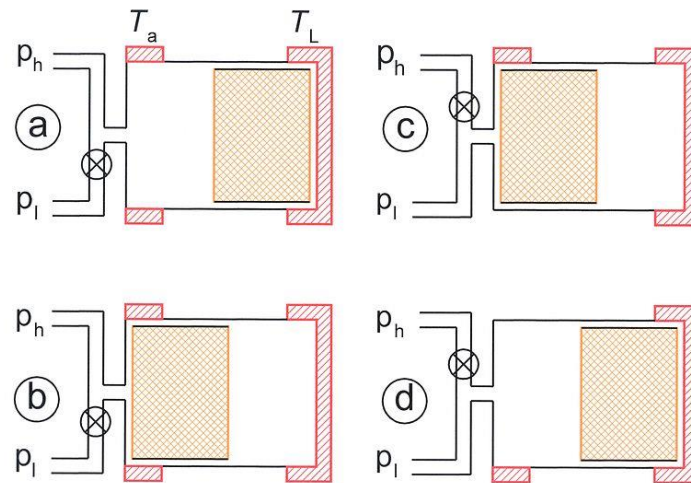


Figura 4.9 – Representação gráfica do ciclo mecânico de funcionamento de um expensor de ciclo Gifford-McMahon. A parte mais à direita, identificada por T_L , corresponde à ponta fria do dedo-frio e o sistema de tubos à direita identifica o estado da válvula, conectada à alta pressão, p_h , ou à baixa pressão, p_l .

É importante referenciar que o regenerador aquece e arrefece ciclicamente no decorrer do funcionamento, este processo permite trazer benefícios de eficiência, de acordo com os trabalhos do próprio inventor (Gifford, 1965)

No nosso caso, o dedo-frio é de dois estágios, querendo isto dizer que temos efetivamente um expensor a trabalhar no seguimento do primeiro, providenciando uma interface a perto dos 30K com uma capacidade calorífica de 20W e uma interface a 15K com uma capacidade calorífica por volta dos 7W. deixando assim uma margem de manobra sobre a potencia que calculámos dissipar (não tínhamos simulado os efeitos da radiação).

No procedimento da produção do escudo radiativo, utilizámos uma tecnologia já conhecida do grupo, chamada de MLI (*multi layer insolation*), que consiste em folhas, extremamente finas de material isolante depositadas de uma fina camada de alumínio polido, separadas entre elas por redes de material muito também ele muito isolante. Quando em vácuo as folhas com alumínio estão quase isentas de condução térmica entre elas, havendo transferência de calor apenas sobre a forma de radiação. Sendo as folhas tão finas e isolantes, rapidamente atingem um equilíbrio radiativo entre elas e a folhas posteriores e anteriores. Como a transferência de calor por meios radiativos é extremamente não linear, a presença de vários estágios de radiação concede um isolamento radiativo quase perfeito.

A implementação do MLI é dificultada apenas pelo facto deste não ser moldável, já que é composto de folhas de alumínio, e pelo facto de cada uma das folhas não poder de modo algum tocar nas outras folhas ou noutro objeto que esteja mais quente, dificultando o método de fixação do MLI.

Foi necessário fazer várias tentativas de escudos de radiação até conseguirmos um que de facto isolasse o primeiro estágio do dedo-frio, o estágio mais frio, da radiação.

4.4.2 Sensores

Para medir as temperaturas fizemos uma pesquisa alargada sobre os sistemas existentes, tendo chegado à conclusão que iríamos utilizar termístores PT100 para medir as temperaturas, com exceção daqueles pontos em que as temperaturas fossem inferiores a 20K, aonde optamos por utilizar sensores de temperatura de diodo. Os sensores empregues foram comprados calibrados ou utilizados na margem de incerteza pequena que apresentam de fábrica.

Todos estes sensores foram operados por um controlador de 8 canais que adquirimos, que permitia inclusive transmitir as informações pela internet e aceder a gráficos dos valores nas últimas horas. A programação da interface pela internet mostrou-se, contudo complicada, tendo sido responsabilidade do meu colega Tiago Frederico.

Através de resistências de aquecimento instaladas no interior e através de um controlador remoto das mesmas foi desenvolvido, por parte dos meus colegas, um ciclo de controlo para podermos correr a experiência a temperaturas bem definidas.

4.4.3 Escudo de radiação e tranças

Como foi mencionado, o nosso dedo-frio é de dois estágios, quer isto dizer que no topo de um primeiro êmbolo a efetuar o ciclo de GM se encontra outro ciclo em que toda a operação se dá a uma temperatura reduzida, atingida pelo trabalho do primeiro estágio.

O escudo de radiação, que tem como finalidade proteger as peças a temperatura menor da radiação térmica produzida pela superfície interior da câmara de vácuo, que se encontra à temperatura ambiente. Para tal, este escudo, composto de materiais de alto fator de refletividade, logo, baixa emissividade, terá de operar, pelo menos na superfície mais interior, a temperaturas mais frias do que a fonte de radiação da qual quer isolar. O nosso escudo térmico está, deste modo, ligado ao primeiro estágio do dedo-frio, permitindo um arrefecimento até aos 30K, com uma potência elevada, já que o primeiro estágio é desenhado para produzir maior potência frigorífica, com o custo de operar a uma temperatura superior.

Tendo as duas extremidades do dedo-frio uma diferença de temperatura de 270K, é necessário um isolamento térmico muitíssimo elevado entre elas para não permitir uma condução parasítica. Sendo as superfícies dos êmbolos do dedo-frio metálicas (conduções térmicas elevadas), o isolamento é derivado da espessura diminuta das paredes dos mesmos. É corolário direto que estes equipamentos não suportam tensões mecânicas ou forças mínimas. Deste modo, não podíamos de modo algum deixar um contato mecânico direto entre o dedo-frio e o SC que sofre a excitação de forças elevadas. Para tal empregámos tranças de cobre.

As tranças de cobre que empregámos eram de um cobre especialmente puro, especialmente no que toca à concentração de oxigénio. O oxigénio do cobre faz com que a condução térmica a temperaturas abaixo dos 50K seja severamente limitada, e as simulações que produzimos indicavam-nos que, para obter uma diferença de temperaturas de menos 4K entre os dois lados da trança, seria necessária uma condução muito elevada. Esta diferença diminuta deve-se ao facto do limite em temperatura de operação do dedo-frio é de cerca de 10K e nós necessitávamos que o SC chegasse aos 15K

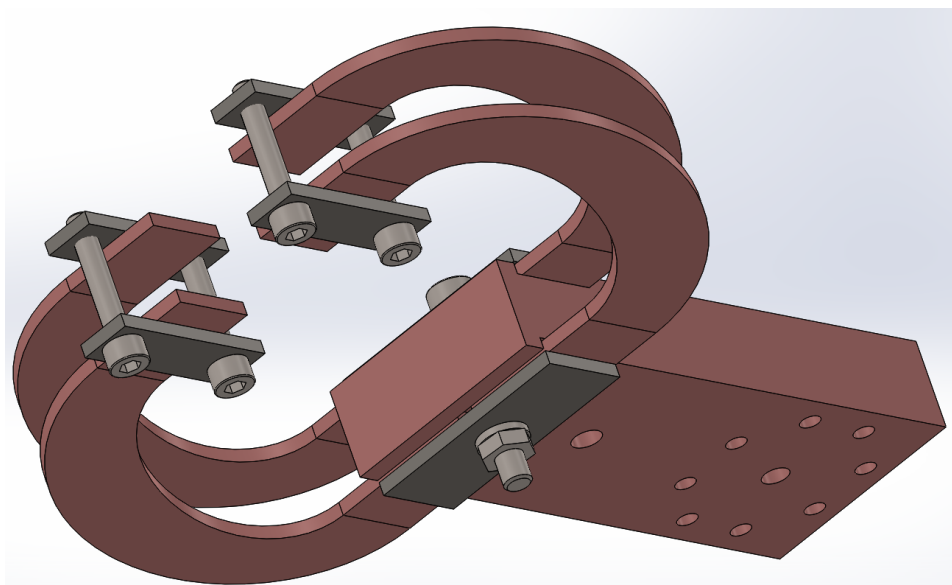


Figura 4.10 – modelo tridimensional do mecanismo de contacto térmico da cabeça do dedo-frio e o SC

O desenho mecânico das interfaces com as tranças e a conceção das trajetórias destas foram vitais para obtermos a condução térmica requerida, a qual se atingiu após muitas iterações de desenho e simulação, já que a condução térmica proposta, a flexibilidade mecânica e um desenho que impedisse ao máximo a formação de correntes de Foucault são condicionantes que conflituam. Também aqui foram cruciais os dados a baixas temperaturas que foram integrados com parâmetros para a simulação.

4.4.4 Simulações e resultados

No decorrer do dimensionamento do sistema de arrefecimento fui encarregue de fazer alguns cálculos e simulações térmicas. Para tal utilizei os dados sobre as propriedades térmicas de materiais a baixas temperaturas, apêndice A.

Utilizando estes dados e estimando a potência do nosso sistema de arrefecimento por troços cheguei aos valores apresentados na Figura 4.11.. Estes dados foram calculados para o relatório de progresso que foi apresentado à ESA (no deliverable FCUL Technical Note 1, BBT (*breadboard test*) Detailed Design).

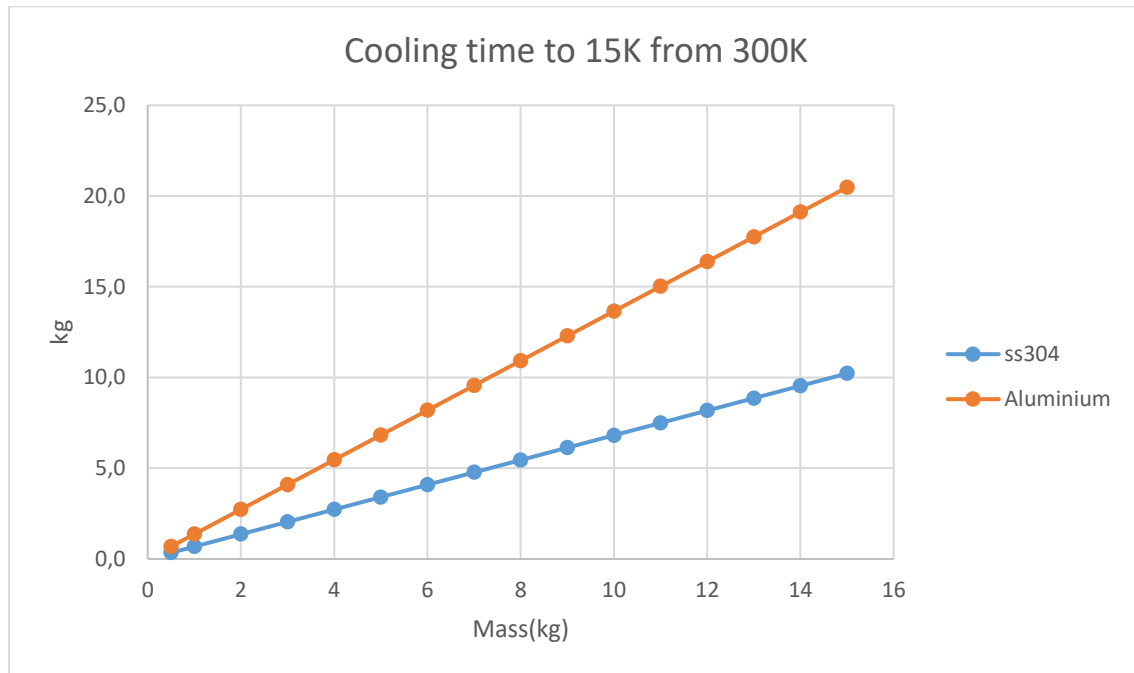


Figura 4.11 resultado das simulações de tempos de arrefecimento de um sólido de alumínio ou aço inoxidável, desde os 300K até aos 15K. Os resultados apresentam-se para vários pesos.

Foi para este documento que simulei também os parâmetros térmicos das duas torres da estrutura da experiência. Figura 4.12. Desta simulação podemos chegar aos dados da condução térmica de 0,143W e uma contração no eixo dos z de 0,130mm

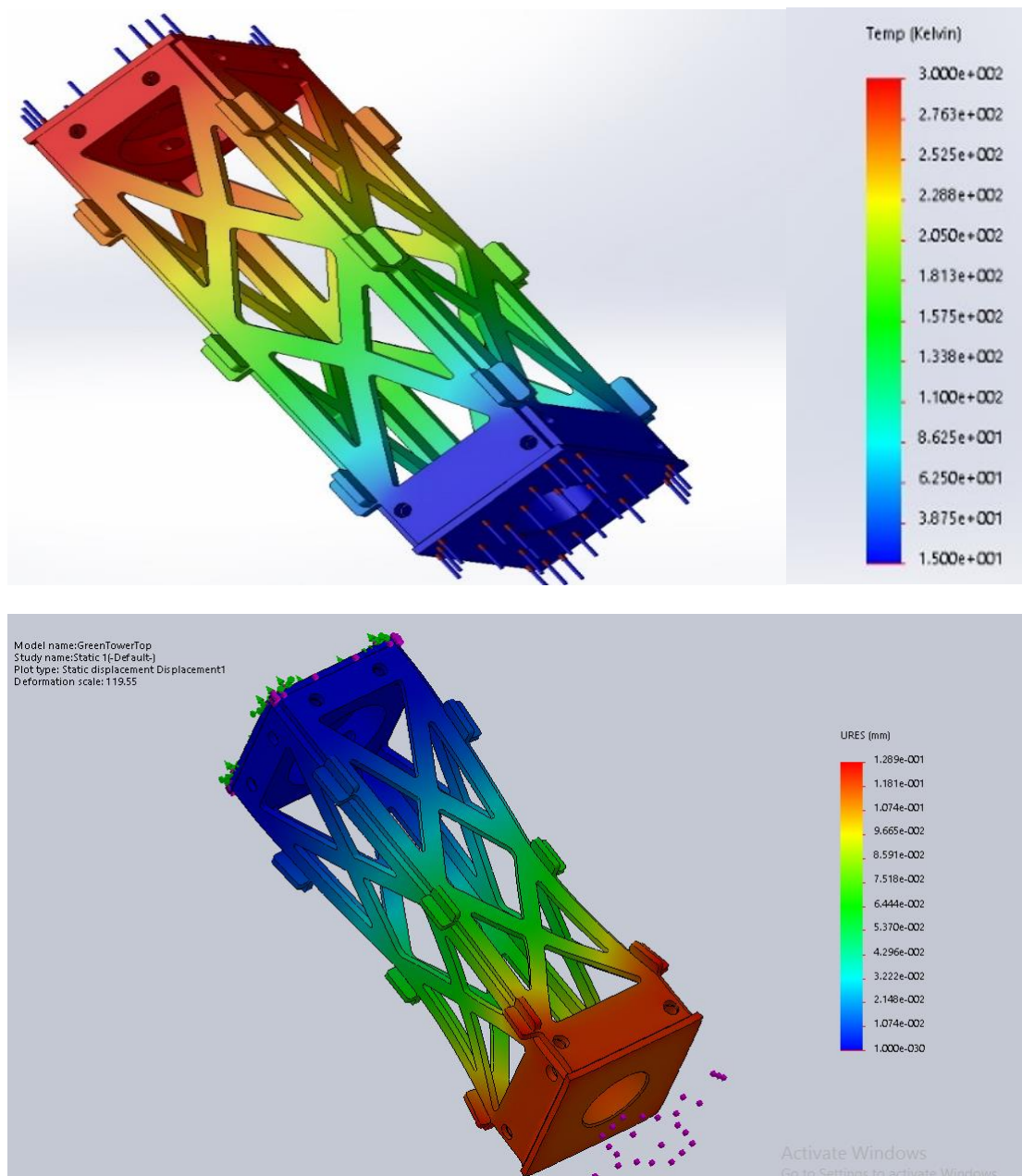


Figura 4.12 resultados da simulação de elementos finitos das torres das estruturas , produzida no software Solidworks. Na primeira imagem temos a distribuição de temperaturas aplicando uma diferença de temperaturas de 300K-15K na estrutura. Na segunda imagem podemos observar as implicações que a distribuição de temperaturas têm sobre a contração térmica da estrutura

4.5 Sistema de forçamento

Um dos sistemas cruciais ao projeto era o de forçamento da suspensão. É necessário aplicar forças constantes da ordem dos 120 N e forças sinusoidais de amplitude 400N, ou algo semelhante.

A aplicação de uma força no vácuo não é, contudo, algo fácil, isto porque os sistemas que operem no interior não têm facilidade em dissipar o calor que produzem e a introdução de forças externas para o interior da câmara não é simples ou muito fiável, não sendo de modo algum descartável como obstáculo o preço acrescido que estes mecanismos apresentam.

Uma das ideias iniciais era a de utilizar um fole metálico para introduzir o forçamento gerado no exterior para o interior (através da movimentação da superfície do fole). Esta ideia tinha como principais contratempos a massa adicional que teria de ser oscilada (a esta frequência qualquer grama impõe um aumento substancial da força necessária) e porque se calculou que um fole metálico dificilmente conseguiria resistir ao número de ciclos de oscilação previstos para as experiências.

Optou-se assim por utilizar mecanismos de forçamento que funcionassem em vácuo.

Do ponto de vista técnico apresentam-se outras dificuldades: a força aplicada tem de ser medida minuciosamente; a posição média do ÍP não se pode deslocar (sem *deriva*) ; a forma do deslocamento tem de ser o mais sinusoidal possível. Por estas razões foi necessário incluir também um sensor de força e um sistema de controlo em ciclo fechado através de um sensor de posição.

Como se perceberá no decorrer deste subcapítulo, a o controlo do atuador seleccionado e a operação do sistema apresentaram mais dificuldades do que o esperado.

4.5.1 Atuadores para o forçamento

Nos testes a realizar pretendeu-se aplicar forças sinusoidais até perto de 100Hz e 1mm de amplitude, com forças máximas que poderão alcançar os 400N.

A amplitude de oscilação máxima, 1mm, constitui uma condição que permite eliminar a necessidade de utilização de equipamentos com grande curso, uma mais valia tendo em conta a frequência aplicada. A amplitude mínima seria assim aconselhável do ponto de vista da potência e força necessárias para o forçamento, contudo, a oscilação terá de ser feita com baixa incerteza em posição e força, o que implica que será complicado encontrar mecanismos mecânicos que não sofram de vibrações e folgas ao nível do valor mínimo de amplitude (10 μ m). Deparamo-nos assim com um compromisso entre acelerações e forças elevadas para amplitudes de 1mm e dificuldades de incerteza e repetibilidade para amplitudes de 10 μ m.

De seguida apresentam-se algumas das opções consideradas para o mecanismo de forçamento, assim como os argumentos a favor e contra.

Tabela 4-1 Tabela das tecnologias ponderadas para o forçamento da suspensão, para efeitos de caracterização da mesma.

Tipo de atuador	Vantagens	Desvantagens	Exemplo
Piezoelétrico	<p>Exatidão de posição e força (Na teoria, a implementação prática poderia se revelar complicada).</p> <p>Tecnologias utilizadas em aplicações de elevadas frequências</p>	<p>Amplitudes demasiado diminutas para produtos <i>off-the-shelf</i>., exceto para os atuadores piezo empilhados - elevado preço e dificuldade de controlo.</p>	<p>PSt 150/5/100 VS10:</p> <p>Força máxima: 800N</p> <p>Amplitude máxima: 130µm</p>
Motor elétrico com parafuso	<p>Precisão mais do que aceitável (motores passo-a-passo).</p>	<p>tempos de resposta elevados e acelerações diminutas</p> <p>Exatidão diminuta e tempos de resposta elevados para atuadores não passo-a-passo</p>	<p>Thomson PC 25:</p> <p>Força máxima – 1250N</p> <p>Amplitude máxima-300mm</p> <p>Velocidade máxima 1.33m/s</p> <p>Aceleração máxima-10m/s²</p>
Pneumático	<p>Facilmente atinge as forças pretendidas. Poderá alcançar as acelerações pretendidas.</p>	<p>Controlo complexo, <i>settling time</i> demasiado elevado e tempos de resposta na ordem das dezenas de ms (vários ciclos à frequência esperada).</p> <p>Baixa repetibilidade - Falta de rigidez.</p> <p>Histerese na aplicação da força (valores de força diferentes entre avanço e retorno)</p>	<p>ADVC-32-5-A-P-A:</p> <p>Amplitude máxima: 5mm</p> <p>Força a 6 Bar:415N retorno, 483 avanço.</p>
Hidráulico	<p>Facilmente atinge as forças pretendidas</p> <p>Maior precisão de movimento em relação aos pistões pneumáticos.</p>	<p>Velocidades e acelerações diminutas para aparelhos de dimensões e peso aceitáveis.</p> <p>Elevada complexidade do sistema (bombas,válvulas etc)</p> <p>Muito provavelmente os tempos de resposta são elevados devido à dinâmica do fluído.</p>	

Bobine eletromagnética “Voice Coil”	Forçamento eletromagnético, permite tempos de resposta inferiores e atritos minorados-acelerações elevadas. Controlo do forçamento e posição relativamente fácil	Dificuldade em atingir as forças pretendidas (para produtos <i>off-the-shelf</i>)	H2W technologies NCC08-34-350-2X: Amplitude: 10mm Massa móvel: 0,46 kg Força máxima: 467N Contante de tempo elétrica: 0,80 ms
Moving Iron Actuator	Forçamento eletromagnético, permite tempos de resposta inferiores e atritos minorados-acelerações elevadas. Fácil controlo do forçamento e posição.	Massa móvel elevada.	Cedrat-MICA500L: Amplitude: 5mm Força máxima: 535N Massa móvel: 1.100 kg Resolução em posição: 15 μm (já continha um sensor de posição, provavelmente)

De todas estas opções foi escolhida a de uma *voice-coil*. Esta permitiria, no que toca aos valores nominais, implementar a dinâmica de que necessitávamos e, no caso do modelo selecionado, operar em vácuo. A folha de dados técnicos apresenta-se nos anexos.

4.5.2 Sensores de força

Para se poder fazer um cálculo da transmissibilidade do sistema de suspensão será necessário medir a distância entre íman e o SC. e a força correspondente. Pelo princípio da par ação reação, se não existirem outras forças envolvidas, basta-nos medir a força no íman ou no SC.

Para evitar ter os sensores na zona fria (15 K), decidiu-se colocar um sensor solidário com o íman.

Devido à necessidade de uma solução compacta, sensível e de implementação simples a opção de *load-cell* (transdutor força-sinal elétrico) apontada será a de utilizar sensores *strain gage* (um objeto rígido elástico no qual se mede a deflexão como medida da força a este aplicada, a deflexão é medida pela variação da resistência elétrica de um fio fino com a sua distensão). À decisão ajuda o facto de estes sensores serem muito insensíveis ao meio que as rodeia, em especial os campos magnéticos, e serem bastante rígidos, sendo normalmente produzidos em metais mais rígidos.

O sensor que utilizarmos terá de operar em vácuo e terá de ser capaz de resistir a pequenas de forças de torção, já que, para não afetar a medição, a totalidade das forças aplicadas as torres terão de passar pelo sensor de força. A prática pôs em evidência esta necessidade pelo facto de eu ter desconjuntado uma *load-cell* através de um pequeno erro nos parâmetros do ciclo de controlo.

A dificuldade de obtenção de informação clara e abrangente sobre os produtos no mercado, assim como a falta de produtos *off-the-shelf* que tivessem as características que procurávamos, levou a que a *load-cell* que selecionamos, apesar de ter cumprido o objetivo proposto, apresentasse uma sensibilidade

muito baixa. O ambiente de ruído produzido pelo atuador eletromagnético fez com que o sinal da *load-cell* tivesse dimensões iguais ou inferiores ao sinal de ruído, dificultando muito a obtenção de dados. Mais tarde viemos a constatar que muito deste ruído viria da fonte de alimentação utilizada (fonte de tensão para laboratório).

Os sensores de força adquiridos já vieram calibrados, contudo, devido as diferentes alterações dos parâmetros de funcionamento do amplificador de sinal etc, tivemos que proceder a uma calibração no laboratório, a qual fizemos utilizando massas pesadas.

4.5.3 Sensores de posição

Como referido anteriormente, parte do objetivo da experiência é produzir as curvas características da transmissibilidade da suspensão magnética, ou seja, a força que a suspensão transmite aquando de um forçamento externo. Estas curvas aplicam-se apenas a sistemas lineares, pelo que iremos caracterizar o sistema apenas para pequenas variações em relação à força estática: posição de equilíbrio da massa. Esta aproximação é bastante aceitável neste caso, já que no instrumento final teremos uma massa de 12kg suspensa com forçamento dinâmico de intensidade aproximada de 0,1 N.

Se computarmos a amplitude de oscilação de uma massa de 12kg forçada em 0,1N a 30Hz chegamos a um resultado próximo de 0,3 μ m. Compreende-se assim que a resolução espacial do sistema de medição da posição do íman (parte móvel) será uma característica limitadora do sistema de teste a desenhar.

A suspensão terá então de ser estudada para forças superiores, para que os deslocamentos sejam mensuráveis, e os valores para as condições desejadas terão de ser interpolados.

A conjugação entre a resolução necessária e a taxa de aquisição (cerca de 1ms para uma amostragem aceitável da oscilação de frequência de 100Hz) leva a um conjunto diminuto de tecnologias para a medição de posição, das quais se apresentam na seguinte tabela um conjunto bastante representativo:

Tabela 4-2- Tabela das tecnologias ponderadas para a medição da posição relativa entre os componentes da suspensão.

Tipo de sensor de posição	Vantagens	Desvantagens	Exemplo
Distanciómetro laser	Insensível a campos eletromagnéticos	Sistemas integrados (e materiais plásticos) – difícil de submeter a alto vácuo	Intervalo de medição: ± 5 mm Resolução: 1.5 μ m Linearidade: $\pm 0,3\%$ F.S (<i>Full Scale</i>) Período de medição: 30 μ s
Detetor de deslocamento por indução	Sensor sem contacto necessário com a instrumentação e composto de materiais metálicos (possível fácil integração no vácuo)	Os campos magnéticos resultantes da experiência poderão degradar o funcionamento do sensor.	Omron ZX-ED01T: Intervalo de medição: 1mm Resolução: 1 μ m Linearidade: $\pm 0,5\%$ Período de medição: 150 μ s

	Robustez derivada da simplicidade da cabeça de medição		
Sensor capacitivo	Alta resolução Sonda preparada para vácuo	Não é perceptível se os campos eletromagnéticos da experiência poderão afetar as medições	CPL350 C8: Intervalo de medição: 1,5mm Resolução: 14 nm@100Hz Linearidade: $\pm 0,3\%$ Período de medição: entre 1ms e 66 μ s

Foi selecionado o distanciômetro laser pela facilidade de instalação no exterior da câmara, utilizando uma janela por baixo do eixo da *Voice-coil*. A utilização deste sensor no exterior permitiu que este fosse um produto genérico e, portanto, muito menos custoso do que se tivesse de ser preparado para vácuo.

A calibração, *in situ*, do sinal produzido pelo sensor laser foi possível porque este, para além de comunicar as suas medições através de um sinal de corrente, também as apresentava num leitor LCD no próprio sensor. A utilização de vários pontos de valor medido no sensor e os valores que este transmite permitiu, assim, a calibração. Esta foi necessária pois o intervalo de medição apresentado pelo sensor no LCD era diferente do que os sinais que este transmitia, sendo este último programável para melhor resolução.

4.5.4 Controlo

O controlo do sistema de forçamento revelou ser um dos pontos mais trabalhoso e problemático do projeto. A dificuldade reside na multitude de opções que podiam ser tomadas no que toca à aquisição de sinais dos sensores, da eletrónica e software de processamento para o controlo e da operação da *Voice-coil*. Cada um dos subsistemas será discutido adiante em maior minúcia.

4.5.4.1 Aquisição de sinais

Para o funcionamento do ciclo de controlo que opera a *Voice-Coil* é necessário o acesso à posição instantânea do veio do atuador. Por estarmos a trabalhar com frequências máximas de 100Hz o sensor deverá ter um tempo de resposta e uma frequência de leitura correspondentes pelo menos aos 1 kHz (ter pelo menos 10 pontos por período, o que já é uma amostragem bastante diminuta)

O sensor foi já mencionado no subcapítulo anterior. É, contudo, importante referir que este transmitia os resultados da sua medição sobre a forma de corrente, sendo necessário aplica-la a uma resistência para poder ler um valor de tensão que a maioria dos CAD, conversor analógico digital, lê no seu funcionamento (Isto porque o nosso controlo foi feito digitalmente e não através de uma implementação eletrónica analógica).

No circuito que implementámos o tempo de resposta foi limitado apenas pelo sensor, tendo o CAD do circuito de aquisição uma frequência de aquisição de aproximadamente 1 MHz, sendo deste modo implementar eletronicamente uma amostragem por média de 16 valores (o máximo que a eletrónica permitia).

A utilização da mesma massa para o circuito do sensor como para o circuito de controlo, que era também a massa do sistema de forçamento, foi obrigatória, por ser a única maneira de garantir que nenhum dos sinais, que são tipicamente diferenciais, tinha um valor de tensão comum mais elevado do que outro sinal, soube pena de danificar o circuito de digitalização em controlo (Como deveras, infelizmente, até aconteceu com alguma incidência).

4.5.4.2 Sistema de operação da Voice-Coil

A operação da Voice-Coil (leia-se, o *driving* da Voice-Coil, na falta de melhor sinónimo) é feita por eletrónica de potência que permita impor sobre a bobine uma corrente elevada e também derivadas da mesma elevadas. Só através desta corrente elevada e derivadas elevadas é possível forçar o movimento do ÍP que compõe o veio central móvel do atuador linear.

Usando as características do apêndice B é possível chegar à conclusão que para excitar a força que pretendemos na suspensão é necessário perto de 40V-4A no momento da força máxima, e um total de 14V no momento da velocidade máxima, que corresponde à maior derivada da corrente na bobine.

Inicialmente adquirimos uma fonte/controlador produzido pelo mesmo fabricante da *Voice-Coil* para a mesma. Este instrumento recebia um sinal em tensão e impunha uma corrente proporcional na *Voice-Coil*. O *driver*, como lhe chamamos no grupo, foi complicado de instalar e inicializar já que este continha um conjunto elevado de circuitos de proteção que já vinham ativados e tiveram de ser reinicializados, mas após esta árdua operação ser bem-sucedida foi possível operar a *Voice-Coil* com relativa facilidade, tendo testado este funcionamento através da placa de aquisição de sinais, e neste caso geração, da National Instrumentstm. Rapidamente constatámos que a amplitude a 100Hz era diminuta.

Estando este passo feito foi altura de nos focarmos no processo de controlo. Rapidamente nos apercebemos que implementar um sistema de controlo que operasse a 100Hz com uma inércia tão elevada e uma força algo limitada não era factível.

Por infortuna coincidência, o controlador avariou nesta altura. Arranjá-lo era quase tão dispendioso como comprar um novo, e muito moroso. Não sabendo o que teríamos feito de errado para o avariar. Como tal, e porque estávamos muito pressionados em tempo, sugeri a utilização de drivers H-Bridge como os que tinha estado em contacto poucas semanas antes.

Um *driver H-bridge* é, no seu essencial, um conjunto de quatro transístores ligados numa geometria que perfaz um H, daí o nome. Estes permitem receber da fonte potência sobre a forma de uma tensão e corrente constante e gerar um sinal bipolar binário. Figura 4.13

O facto de a transformação ser binária faz com que não haja perdas, e, portanto, aquecimento excessivo, já que os transístores só têm de operar em regime de impedância máxima e impedância mínima, o que, sendo MosFets de potência, é bastante baixa. Esta baixa dissipação é exatamente a razão pela qual se tornaram comuns estes circuitos para operar motores.

O processo de funcionamento é através do chamado PWM, *Pulse Width Modulation*, correspondente a enviar para a *H-bridge* um sinal repetitivo de frequência fixa, perto de 80kHz no nosso caso, e flutuar a percentagem de tempo em que ele está a conduzir numa direção e na outra. Tendo a bobine do *Voice-Coil* uma indutância elevada, que tem o efeito de estabilizar a corrente temporalmente, o variar da

polarização do sinal que provém da *H-bridge* é filtrado, ficando apenas o resultado médio. Deste modo, enviar um sinal para a bobine com 80% do tempo numa polarização e 20% na outra corresponde, efetivamente, a enviar uma tensão de 80% da tensão máxima.

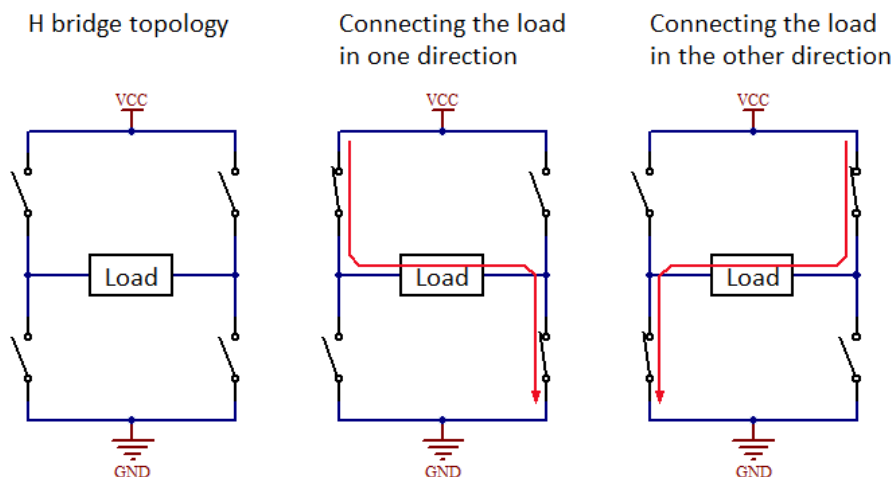


Figura 4.13 – Esquema representativo do funcionamento de uma H-Bridge. Nas várias imagens podemos observar a direção da corrente, apresentada a vermelha, de acordo com as diferentes combinações de transístores a conduzir.

A utilização deste sistema permitiu que os testes imediatos fossem bem-sucedidos, contudo os drivers que encontrámos só operam até aos 30 V que, como vimos, é um valor inferior ao que teoricamente necessitaríamos. A ligação à massa elétrica deste circuito, tendo ele um lado de potência e um lado de sinal, foi parte da fonte dos problemas severos de massa que tivemos na implementação da experiência.

4.5.4.3 Processamento do controlo

Por fim foi necessário a implementação do ciclo de controlo, que optámos, à falta de outra alternativa imediata, implementar através de processamento digital, ainda que se trate de um controlador PID, *Proportional Integral Derivative*, por simplicidade de implementação.

A tentativa inicial de utilizar a placa de aquisição (e geração) de sinais da National Instrumentstm rapidamente se demonstrou impraticável. Esta conseguia produzir sinais até aos vários kHz e ler até, também, às centenas de kHz. Contudo, a necessidade de os dados serem transmitidos ao computador e o aguardar pela resposta do ciclo de controlo programado fez com que, em conjunção com a lentidão da interface USB em transitar entre a transmissão e receção de dados, a resposta do sistema estivesse limitada a um controlo até aos 30Hz.

Enquanto nos deparávamos com esta dificuldade e com a necessidade de transitar para um sinal de controlo em PWM empenhei-me na programação e utilização de um processador de sinal Arduino DUEtm. Todos os testes decorreram com excecionais resultados, mas, no momento da implementação, deparei-me com o facto de a frequência constante da saída do Arduino de PWM ser de 1kHz. Esta frequência é claramente demasiado pequena para possibilitar um controlo que se pretende variar a 1kHz (não efetuando o número de ciclos suficientes para produzir uma resposta média na bobine entre cada intervalo de controlo de 1ms).

Mediante as dificuldades apresentadas foi decidido implementar o ciclo de controlo num microcontrolador que já tinha sido utilizado pelo grupo, um BeagleBonetm green. Este emprega um microprocessador TI sitara ARM-cortex A8 semelhante aos que se encontram nos telemóveis de topo.

Apresenta um conjunto de CAD de frequência na ordem dos MHz, conectores de saída com PWM programável até também alguns MHz. Um processador a trabalhar a 1GHz e duas PRU, *programmable real-time unit*, a 200MHz, perfeitas para a implementação do controlo que pretendíamos.

As PRU, circuitos paralelos ao CPU que podem ser programados para trabalhar independentemente deste e que permitem cálculo real-time (repetibilidade no tempo de cálculo elevada e baixo nível de complexidade na implementação das operações), e que se apresentavam como as soluções perfeitas, tinham na realidade a inconveniência, por nós desconhecida até então, de não fazerem *floating point operations*, sendo estes apenas concebidos para o processamento relacionado com interfaces de comunicação entre sistemas e não para cálculo matemático. Não obstante, este menor contratempo não foi impeditivo pois o processador central era rápido o suficiente para poder produzir o controlo que necessitávamos. Para tal foi necessário, contudo produzir um programa não na forma normal, mas sim como módulo do *Kernel* com vista a poder suspender o funcionamento do sistema operativo, Linux, no decorrer das medições, possibilitando um tempo de resposta elevado e uma maior repetibilidade do ciclo de controlo. Este módulo foi continuamente desenvolvido e crescendo em funcionalidades no decorrer do projeto.

No que toca ao ciclo de controlo, a utilização de um controlador PID não se revelou muito frutífera já que os limites de força aplicáveis através do controlador da *voice-coil* eram pequenos relativamente à massa/rigidez da suspensão e os tempos de resposta necessários de 1ms, ou seja, o sistema de forçamento estava demasiado limitado para se poder assegurar um funcionamento correto para um simples ciclo PID. Um controlador de *voice-coil* que possibilitasse uma tensão superior teria facilitado este aspeto, por outro lado, um ciclo de controlo mais avançado e mais adaptado talvez tivesse melhorado a performance (já que, mesmo estando limitado, a *voice-coil* conseguia produzir forças elevadas quando o controlador era conduzido ao seu máximo).

Um modelo bem estabelecido do controlo talvez tivesse permitido prever estas dificuldades e ajudado a estabelecer requerimentos mais acertados para o sistema de controlo, porém, o tempo disponível para o desenvolvimento do mesmo era muito limitado e, na prática, os efeitos resultantes do ruído, vibrações, variações da massa etc, faziam com que uma modelação do sistema que produzisse resultados fosse impraticável.

No que toca à modelação tida em conta, foram consideradas as contas da cinemática relativas ao movimento da massa/forçamento da suspensão e foram dessa forma estimadas as forças e sinais necessários. Era esperado que o sistema de controlo permitisse apenas mitigar desvios mínimos a esta dinâmica, tal não foi verificado.

No momento da utilização do ciclo de controlo foi necessário obter os ganhos de modo empírico, sendo que, o ganho da componente derivativa não foi utilizado devido ao excesso do ruído dos sensores a esta amplitude e o ganho integral foi mantido baixo já que este mostrou ser uma fonte de estabilidade, ao contrário do que é empregue para.

4.5.4.4 Problemas de massa

Uma das principais e mais complicadas dificuldades relacionada com este projeto foi o lidar com os problemas relacionados com as massas elétricas dos vários equipamentos utilizados. O problema advém do facto de alguns dos sistemas de controlo e aquisição de dados serem digitais e outros analógicos. Concretizando, os dois sensores transmitem os valores medidos através de sinais analógicos, o processador recebe sinais analógicos e emite sinais digitais e o controlador da *voice-coil* recebe sinais digitais.

O problema é posto pela conceção a fazer entre as terras ou massas dos vários instrumentos e das suas fontes de alimentação.

O sensor de posição tinha que ter a massa ligada ao ANGND, *analogic ground*, do Beaglebone, pois só assim se poderia ler o seu sinal diferencial no CAD. A tensão da terra da fonte de alimentação do sensor não poderia, contudo, diferir muito da massa do sinal transmitido ou isso iria produzir tensões internas no sensor que poderiam provocar danos ao mesmo.

O sensor de força tinha uma unidade responsável por o alimentar e amplificar o seu sinal. Mais uma vez a terra da unidade não poderia diferir muito da massa do sinal diferencial que transmitia a informação para o BeagleBone.

Por seu lado o BeagleBone enviava da sua parte digital o sinal PWM para o controlador da *voice-coil* e, portanto, este circuito partilhava a massa com o DGND, *digital ground*, do BeagleBone. Acrescia ainda que a diferença de tensões entre o AGND e o DGND do BeagleBone também não poderiam diferir muito sob pena de danificar os CAD, que são tidos como altamente sensíveis a esta transição.

No decorrer das várias tentativas, que resultaram em queimar três BeagleBones, chegámos a desenvolvimentos e avanços importantes:

- A massa do controlador estava conectada entre o cabo de potência e a massa do fio de sinal do BeagleBone. Impondo assim, que a fonte de alimentação do Voice-Coil teria de estar referenciada à mesma tensão que todos os outros circuitos, o que, sendo um circuito de potência, injeta uma quantidade elevada de ruído para todo o sistema.
- Ligar todas as massas externamente para garantir que se minimizavam as passagens de potência pelo BeagleBone revelou-se benéfico, mas não eliminou todos os problemas.
- Impor o mesmo ponto de referencia aos dois sensores não funcionou e fazia com que ambos tivessem reações impróprias e de possível degradação.

No continuar das tentativas tornou-se clara a necessidade da produção de um circuito de adaptação de sinais que permitisse ler os sinais diferenciais dos dois sensores e produzir um sinal com modo-comum igual e adaptado aos CAD do BeagleBone. Foi também instrumental a necessidade da produção de um circuito que permitiu isolar o modo-comum do sinal do controlador da *voice-coil* com o sinal digital do BeagleBone.

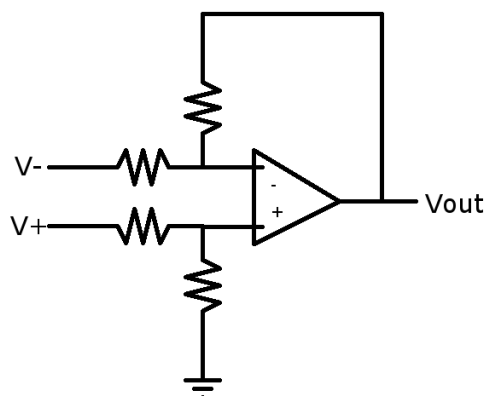


Figura 4.14 – amplificador de isolamento. Esquema do circuito elétrico que utilizámos para adaptar os sinais dos sensores para os CAD do BeagleBone sem ter problemas como modo-comum. A massa representada pode ser definida a uma tensão de offset para permitir que um sinal bipolar seja transformado num sinal monopolar.

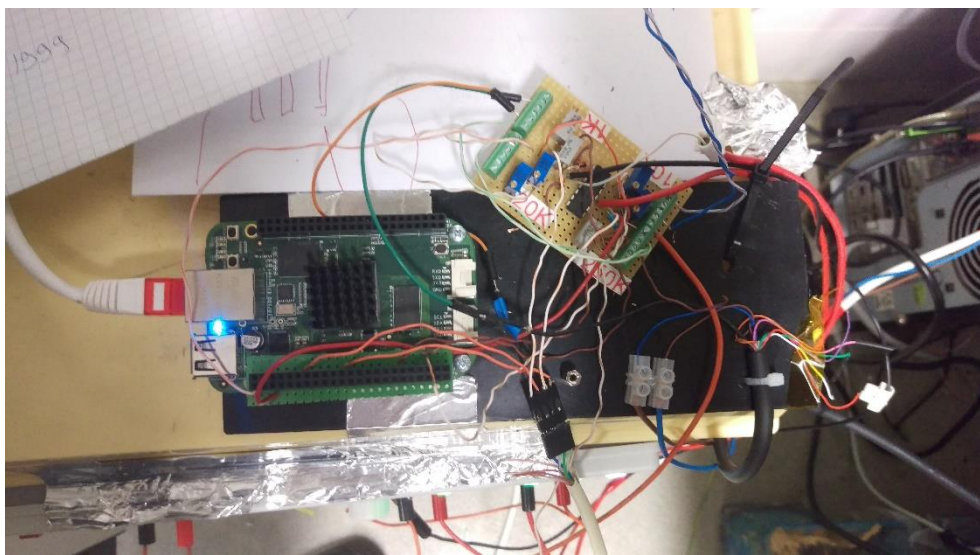


Figura 4.15 – fotografia do circuito de adaptação de sinal já implementado e em funcionamento. A verde e à esquerda temos o BeagleBone e à direita, a castanho, temos o circuito produzido que consiste em quatro módulos iguais ao circuito representado. As resistências foram calculadas através de um cálculo implementado no Excel[™] e através de uma otimização, contudo, foram implementadas através de potenciômetros para possibilitar a calibração do sistema que foi feita através de uma fonte de tensão regulável.

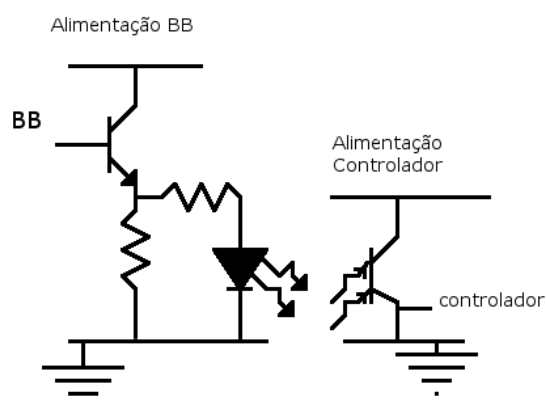


Figura 4.16 – Esquema do circuito elétrico utilizado para isolar a parte digital do BeagleBone do controlador da voice-coil. O sinal do BeagleBone tem primeiro de ser amplificado para poder ativar um led que irá transmitir o sinal por luz a um fototransistor que irá por sua vez ativar o estado binário correspondente no controlador.

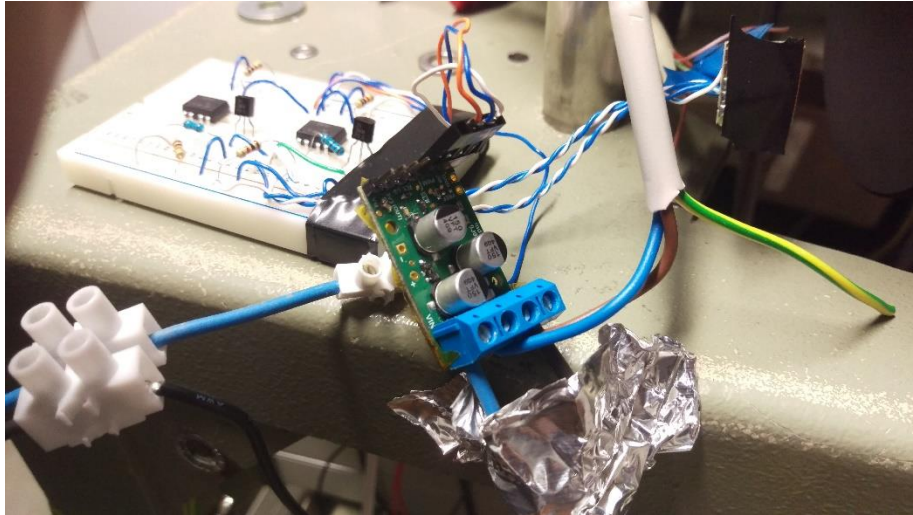


Figura 4.17 – fotografia da implementação do isolamento ótico do controlador da voice-coil. Foram implementados dois circuitos de isolamento já que foi necessário um para o sinal PWM e um para o enable. À direita podemos ver, a verde, o controlador da voice-coil, com uma dimensão pouco maior que uma moeda e transferindo um máximo de 600W. A dimensão é mais flagrante quanto em comparação ao controlador analógico inicial que tinha a dimensão de um disco-rígido e uma superfície de metal grande para dissipação. A diferença dos tamanhos advém da eficiência inerente à utilização de PWM.

Uma das grandes fontes de ruído detetadas foi a terra do edifício, provavelmente partilhada com as ligações de outras máquinas já que se trata de um laboratório. Deste modo, a alimentação de todos os circuitos passou a ser feita por baterias com o objetivo de eliminar por completo o ruído da terra.

4.6 Sistema de Posicionamento tridimensional (HDRM)

De seguida irei fazer uma descrição de um dos instrumentos da experiência de teste do HDRM. Ainda que esta experiência não tenha sido avançada, irei descrever o processo de desenvolvimento deste instrumento pelo facto de ter sido da minha responsabilidade.

4.6.1 Requisitos do sistema

A utilização de uma suspensão magnética com recurso a supercondutores impõe a existência de um sistema de posicionamento e fixação, dos objetos a suportar, enquanto não se tiver atingido a fase supercondutora. Como referido, no nosso projeto, este sistema foi apelidado de HDRM (*Hold-Down Release Mechanism*) e permitiria ainda a recolocação, sempre que necessária, do objeto na posição correta (permite uma repetibilidade elevada ao longo de todo o tempo de vida do sistema, caso contrario, dissipações, etc. iriam impossibilitar essa repetibilidade).

Este subsistema terá que conseguir erguer uma massa de 12kg e posiciona-la com extrema repetibilidade (menos do que $\pm 50\mu\text{m}$ numa direção e $\pm 120\mu\text{m}$ nas outras duas), terá também de operar em vácuo e à temperatura de 15K, pelo que o isolamento térmico constitui um requisito central da montagem de teste deste sistema.

Devido à necessidade de medir a posição da massa em todas as direções em simultâneo e devido às dificuldades inerentes à temperatura e consequente condução térmica do objeto da medição, a utilização de processos que funcionem com contacto mecânico não é aconselhável. Este critério elimina uma grande parte dos sensores comercialmente disponíveis, sendo que o custo dos mesmos já é por si bastante limitativo.

4.6.2 Solução proposta, problemas e correção

As soluções a equacionar teriam de envolver grandezas físicas que se propaguem em vácuo, pelo que, numa visão pragmática, seriam possibilidades as seguintes grandezas: campos elétricos estáticos, campos magnéticos estáticos e campos eletromagnéticos.

Devido à proximidade do sistema a materiais magnéticos e possíveis correntes elétricas induzidas, e por uma questão de simplicidade, a solução proposta é a de incidir um feixe laser, radiação eletromagnética, na massa e medir a posição das reflexões obtidas (a utilização de reflexões permite uma análise geométrica simples, se o sistema utilizar superfícies planas).

Por causa do ambiente de vácuo da experiência, e, portanto, da baixa dissipação térmica, a alternativa mais viável seria a de posicionar o laser no exterior da camara de vácuo, impondo a utilização de uma janela para a entrada do feixe e, portanto, tornando a utilização de mais de um feixe algo custoso e/ou complicado. A solução passa assim por encontrar um método de dividir o feixe e utilizar os vários feixes emergentes para medir a posição por reflexão.

4.6.3 Sensores PSD

Por facilidade, e possível utilização para medição de deslocamentos rápidos, foram escolhidos para detetores da posição dos reflexos os sensores PSD (*Position Sensitive Device*).

Um sensor PSD é um tipo de fotodíodo extenso que permite medir diretamente a localização da média aritmética da distribuição de intensidade espacial do feixe de luz incidente.

De modo geral estes sensores são compostos de um fotodíodo extenso aonde se deposita uma camada de material resistivo na superfície posterior. As cargas excitadas pela radiação incidente são conduzidas

por esta camada resistiva para um dos dois contactos eléctricos que se encontram nos extremos opostos da mesma. Comparando a quantidade de corrente que flui através dos dois contactos (localizados nos extremos da camada) é possível averiguar a posição de incidência do feixe.

Na realidade cada ponto de incidência contribui para a corrente em cada contacto de uma forma linear à intensidade incidente nele e à distancia ao contacto, e são estas duas linearidades que permitem concluir que a posição avaliada pela comparação das duas correntes é na realidade a média geométrica da distribuição do feixe.

A operação destes sensores com o recurso a dois eléctrodos permite, sendo uma medição feita em simultâneo, excluir erros que advenham de flutuações de intensidade de luz, flutuações térmicas etc, sendo todos estes erros eliminados através da normalização dos valores medidos à soma dos mesmos, isto é, estas flutuações afetam as medições nos dois extremos de modo igual e podem portanto ser descartadas se a medida for feita pela relação entre os dois lados e não pela medição de cada um em separado (Fujita and Idesawa).

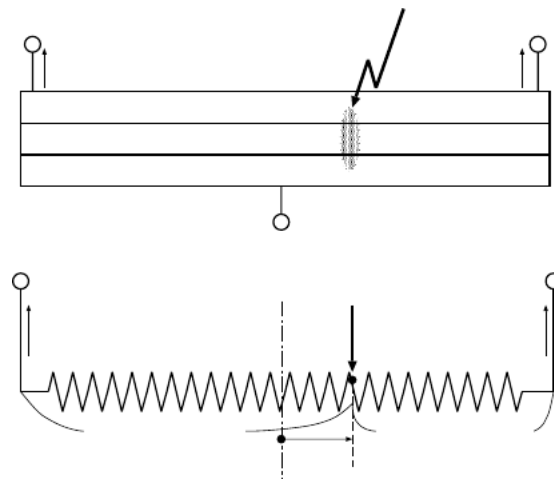


Figura 4.18- Diagrama ilustrativo do paradigma de processamento dos sinais dos detetores PSD : o Ponto de incidência do feixe de luz funciona como uma fonte de corrente cuja intensidade é dividida entre duas resistências. As resistências apresentadas nos contactos são assim, respetivamente, $(0,5 + \text{distância ao centro/tamanho do detetor}) \cdot R_{\text{entre contactos}}$ e $(0,5 - \text{distância ao centro/tamanho do detetor}) \cdot R_{\text{entre contactos}}$

4.6.4 Teste de estimação de performance

Com o fim de testar a sensibilidade que poderíamos obter através da utilização de sensores PSD com um circuito simples de transimpedância (amplificador operacional com uma resistência na retroação) desenhou-se a seguinte experiência:

- A fonte de laser foi montada num estágio de translação (resolução de $1\mu\text{m}$), em cima da mesa ótica, e o feixe alinhado para incidir perpendicularmente na superfície do detetor, que se encontrava solidário com a mesa.
- Através da movimentação da mesa de translação e com recurso a um programa de aquisição em labview desenvolvido para este efeito, foi possível estimar o tipo de resolução e ruído obtido com o detetor e a eletrónica a ela aplicada.

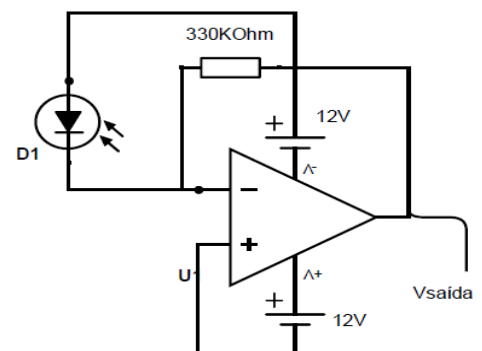


Figura 4.19 – Circuito de transimpedância utilizado na utilização dos sensores PSD.

- O sinal resultante do pré-amplificador de transimpedância foi adquirido por uma placa de aquisição National Instrumentstm.

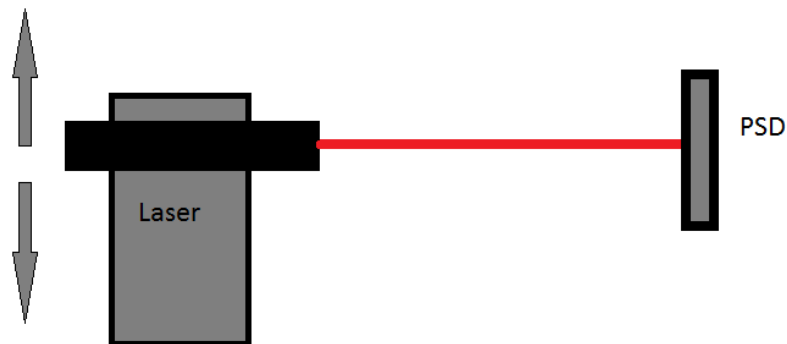


Figura 4.20 - Esquema ilustrativo da experiência de estimação da performance do sistema de detecção com sensores PSD e a eletrônica aplicada

Da experiência descrita foram obtidos alguns dados, dos quais os mais relevantes se apresentam na Figura 4.21 e Figura 4.22. Dos outros testes destacam-se a repetibilidade em posição de $\pm 3,16\mu\text{m}$ e a constatação da ausência de uma tendência temporal a menos de alguns minutos, ou até horas

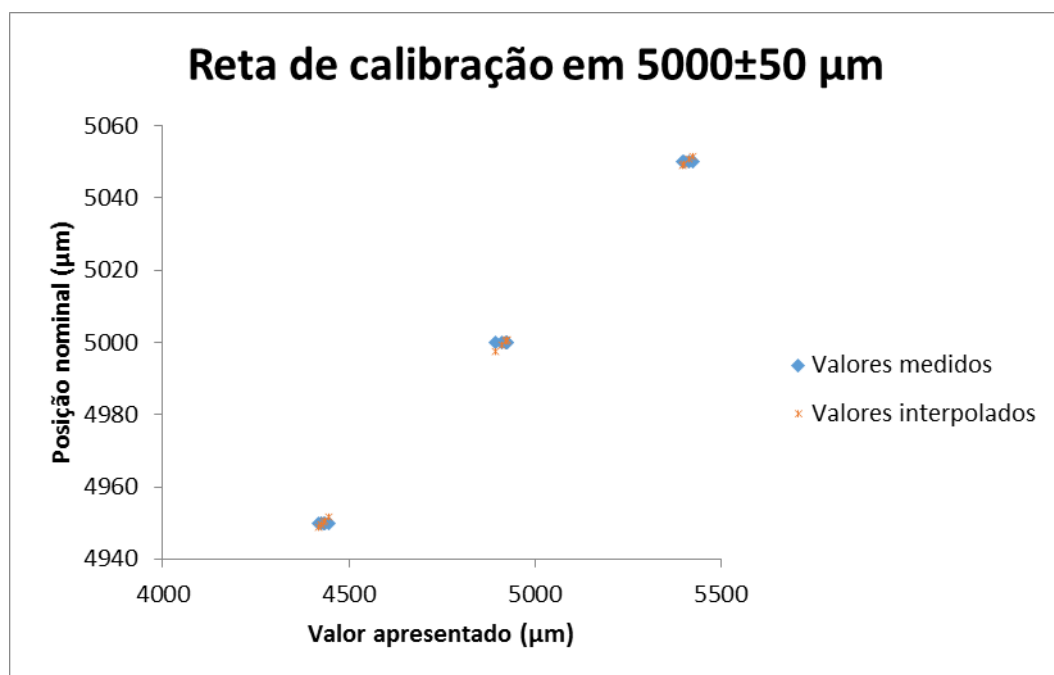


Figura 4.21 – gráfico dos pontos medidos e dos valores obtidos pela regressão linear.

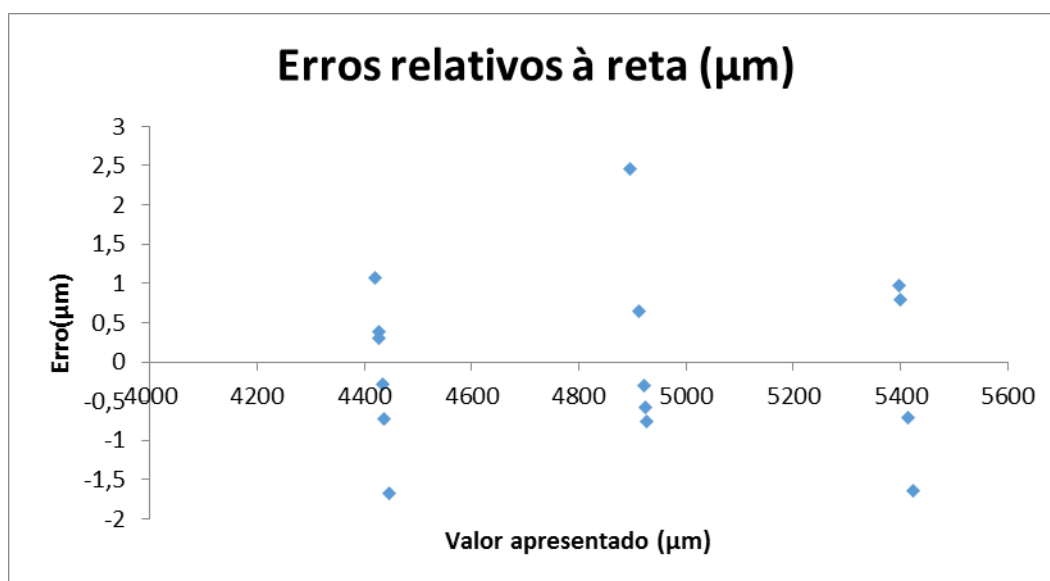


Figura 4.22 – erros relativos à reta da regressão linear. Pode-se confirmar que correspondem a valores muito inferiores aos limites da resolução que necessitamos por parte do sistema, que seria algo na ordem dos 10μm.

4.6.5 Design Finalizado

Foram consideradas inúmeras geometrias com espelhos e *Beam-splitters*.

Porque o objeto cuja posição queremos medir teria uma amplitude térmica dos 300K aos 15K, torna-se impensável ter os sensores PSD montados no mesmo, assim, os sensores PSD seriam colocados perto do objeto, mas apenas um sistema passivo de espelhos e *Beam-splitters* solidários com o objeto móvel.

Esta movimentação é assumida como sendo de translação, e nunca de rotação, por simplicidade e pelo comportamento esperado do mecanismo HDRM, responsável pelo deslocamento a medir.

A medição será resultante do deslocamento dos feixes refletidos, provocados pelo movimento das superfícies que os refletem. Para que tal aconteça é necessário que o ângulo de incidência nunca seja nulo (num feixe incidente normal à superfície nenhuma translação afeta a posição do feixe emergente).

Na conceção do sistema uma dificuldade destacou-se. Não conseguimos desenvolver um sistema de medição de coordenadas ortogonais em que as superfícies refletoras se deslocassem, relativamente às suas normais, independentemente.

Assim sendo, para um sistema que efetua a medição das três coordenadas em paralelo, a única solução encontrada foi a de que duas das três superfícies refletoras estivessem numa disposição que levasse a que as suas medidas fossem dependentes entre elas. A computação do efeito desta dependência permite a transformação matemática para um sistema de três resultados independentes.

Na montagem concebida irão ser empregues 3 detetores PSD (Figura 4.23), dois voltados frente a frente (PSD₁₁ e PSD₁₂) e uma perpendicular a estes (PSD).

O processamento proposto para a análise dos valores medidos é apresentado de seguida (Por simplicidade o processamento é feito de modo diferencial em relação aos pontos iniciais, ajustados para corresponderem aos centros dos sensores PSD).

$$\Delta PSD_n = \Delta Z + \Delta Y$$

$$\Delta PSD_{11} = \Delta Z + \Delta X$$

$$\Delta PSD_{12} = \Delta Z - \Delta X$$

Assim poder-se-à calcular a variação das coordenadas por:

$$\Delta Z = (\Delta PSD_{11} + \Delta PSD_{12})/2$$

$$\Delta X = (\Delta PSD_{11} - \Delta PSD_{12})/2$$

$$\Delta Y = \Delta PSD_n - (\Delta PSD_{11} + \Delta PSD_{12})/2$$

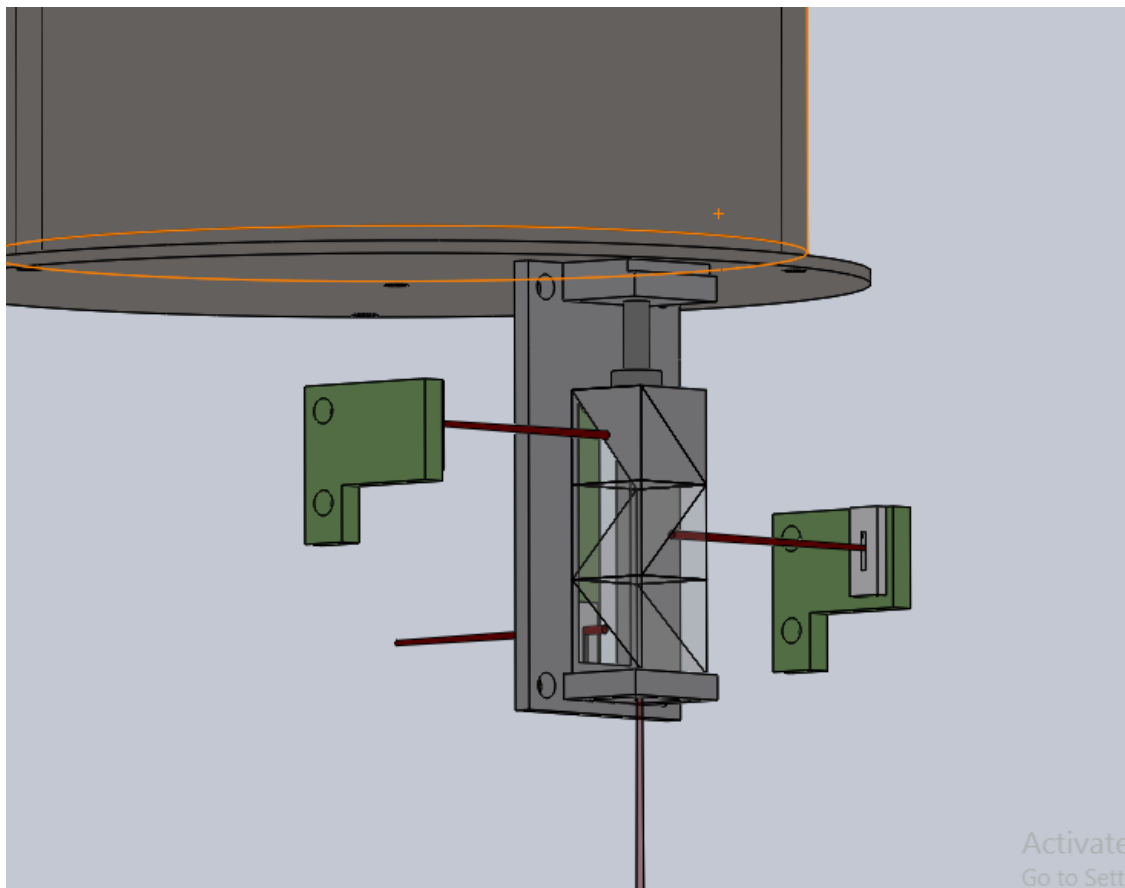


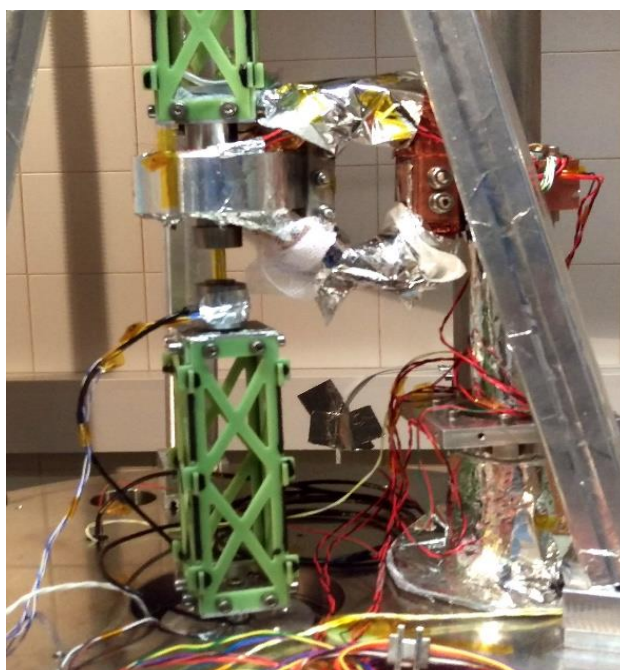
Figura 4.23 - Sistema de medição de posição através de um feixe laser, dois beam-splitters e um espelho. Sistema fixo à massa cuja movimentação terá de ser medida. A vermelho estão representados os feixes incidentes e emergentes do conjunto ótico; a verde (o pedaço posterior não está visível) encontram-se os detetores PSD que medem o ponto de incidência do feixe. De reparar a interdependência intencional das medições dos dois feixes laterais (há duas direções de movimento que afetam diretamente ambas as medições).

5 Resultados e Análise

No final do longo processo do desenho, produção e incorporação do sistema de teste foi possível proceder aos testes preliminares da suspensão supercondutora.

Um dos problemas iniciais foi calibrar as posições, distâncias e ângulos no interior da câmara após o arrefecimento, quero eu dizer, por muito que se alinhe as duas torres e calibremos o sistema de controlo para uma certa distância entre o ÍP e o SC à temperatura ambiente, quando se faz o arrefecimento de 300K para 15K, a contração dos materiais não é desprezável e promove o desalinhamento de todas essas grandezas geométricas. Mesmo utilizando o ISOVAL cuja contração térmica é quase nula, relativamente a quase todos os materiais que não o aço, a contração da torre de suporte ao supercondutor é de cerca de 0,1mm (um valor significativo no âmbito da resolução com que iremos efetuar as medições).

Como tal, e porque não há nenhum acesso a informações do interior da câmara com exceção dos dados dos sensores, foi necessário utilizar o controlo do *voice-coil* para embater o ÍP contra o SC para medir o deslocamento real entre esta distância à temperatura ambiente e a 15K. O resultado esteve bastante distante do simulado (0.143mm simulado para 0.323mm medido), porém, no momento da simulação, todas as peças de titânio que rodeiam o sc não tinham sido feitas e, portanto, não foram tidas em conta. Uma simulação preliminar aponta para uma contração térmica das peças de titânio de cerca de 0.100mm, dando um valor muito mais próximo do medido. Por outro lado, a possível interferência das contrações térmicas das tranças que estão ancoradas às peças de titânio também não foram tidas em conta.



*Figura 5.1 – Fotografia do núcleo da experiência desenvolvida. Podemos ver, à esquerda, as torres de cima e de baixo que suportam, respetivamente, a **loadcell**, o eixo de ÍP, e o cilindro SC. À direita, temos o dedo-frio, em parte oculto pelo braço da estrutura, e as tranças de cobre a ligar a ponta deste ao SC (tapado com MLI para reduzir a radiação incidente).*

5.1 Testes estáticos

Nesta primeira experiência testámos a rigidez da suspensão através de uma deslocação lenta do ÍP entre os dois pontos extremos do intervalo de teste. A variação da força entre os extremos em relação à distância entre os mesmos constitui a medição do parâmetro de rigidez. Para que o resultado do parâmetro de rigidez seja independente da posição este método pressupõe um comportamento linear da suspensão em todo o deslocamento, tal é visível no do gráfico dos sinais medidos.

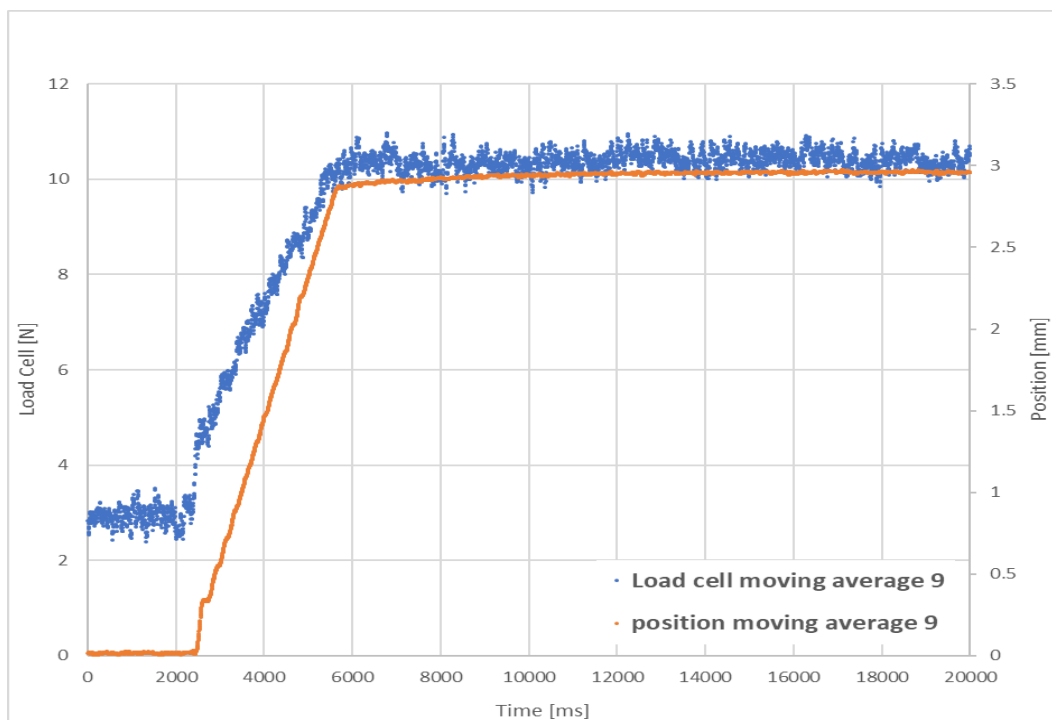


Figura 5.2 – gráfico de uma das medidas de rigidez estática efetuada. A laranja temos o sinal de posição e a azul temos o sinal de força, podemos facilmente concluir que este sofre de um elevado nível de ruído, já que este gráfico corresponde a uma média móvel de 9 pontos (que se pôde fazer graças ao fato de as medições se fazerem a cada poucas dezenas de microssegundos)

Importante referir que entre cada teste o SC foi transitado para o estado sólido e de novo para o estado SC para não haver fenómenos relativos a eventos anteriores (não haver “história” na resposta que obtemos).

De seguida foi também testada a estabilidade temporal da suspensão, ou seja, a existência ou não de *flux creep*. Este teste, constituído do deslocamento da suspensão para o seu ponto máximo limite, após a transição, e monitorização temporal da força necessária para o manter, foi também efetuado para várias temperaturas e foi também efetuado a diferentes temperaturas.

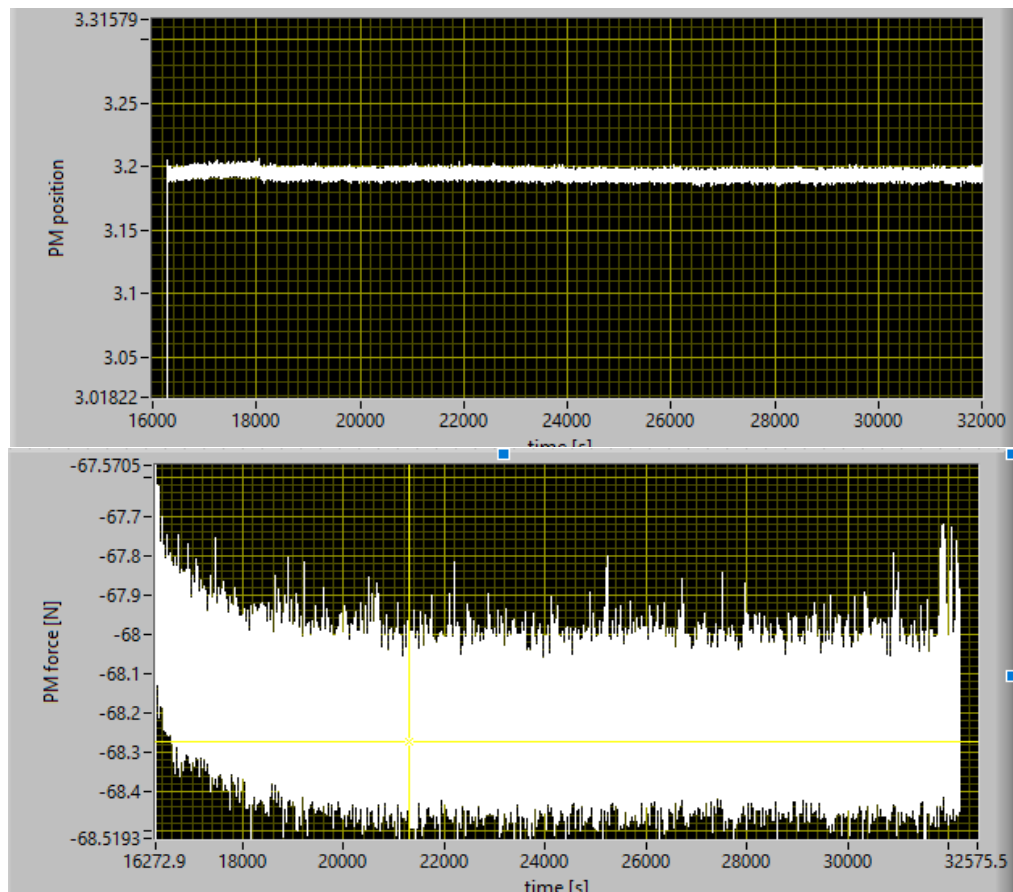


Figura 5.3 – Gráficos dos valores medidos num teste de estabilidade temporal (77K). Pode-se verificar um decréscimo exponencial por parte da força necessária para manter o IP aos 3,2mm, cerca de 0,3N de diferença. Este decaimento não foi detetável após os 83 minutos, o que corresponde a um período significativamente superior aos 3000 segundos esperados. Constatou-se, não obstante, uma estabilização.

5.1.1 Resultados dos testes estáticos

Dos testes feitos obteve-se os seguintes dados:

Tabela 5-1 – in BBT test report. Tabela dos resultados obtidos pelos testes estáticos. Podemos conferir que a rigidez da suspensão varia significativamente com a temperatura. A frequência apresentada corresponde ao cálculo teórico da frequência de ressonância para o objeto final, 12kg com quatro elementos rígidos iguais ao testado.

Experiment reference	Temperature [K]	K [N/m]	ω_m	F [Hz]	STD [N/m]	Notes
TA1A-18K-4/4/2017_run1	18	2510	28.93	4.60	0.29	Initial state before cooldown was 300K.
TA1A-18K-4/4/2017_run2	18	1930	25.36	4.04	0.24	Initial state before test was 90K.
TA1A-30K-5/4/2017_run1	30	1830	24.70	3.93	0.25	Initial state before test was 90K (Only the first 1.8 seconds data was used to calculate).
TA1A-50K-7/4/2017_run1	50	1800	24.49	3.90	0.24	Initial state before test was 90K.
TA1A-77K-5/4/2017_run1	77	1500	22.36	3.56	0.24	Initial state before test was 90K.

Os resultados não apresentam nenhuma limitação à implementação deste sistema de suspensão, já que conferem frequências naturais da suspensão abaixo dos 8,5Hz. A falta de rigidez poderá constituir uma dificuldade acrescida caso se pretenda compensar a força gravítica num ambiente terrestre

No que toca aos testes de estabilidade temporal, o tempo necessário para a aparente estabilização da suspensão variou entre os vinte e três minutos e os oitenta e quatro minutos, obtidos a diferentes temperaturas. O resultado demonstra períodos de estabilização possivelmente superiores ao esperado, contudo, a amplitude do decaimento, correspondente a cerca de 0,5%, corresponde ao esperado e facilmente se enquadrará dentro do intervalo de tolerância do parâmetro da rigidez (já que teremos conjuntos ÍP-SC em direções opostas, que irão anular a variação de posição do objeto a suspender, passando a haver apenas uma redução da força apresentada). Os tempos de estabilização elevados apresentam-se para as temperaturas relativamente elevadas e diminuem com o diminuir das mesmas.

5.2 Testes dinâmicos

Os testes dinâmicos são os testes mais centrais de toda a experiência, em parte porque estes testes são os que suscitam as maiores dificuldades técnicas e que necessitam de uma montagem menos habituais. As informações provenientes destes são, também por essa razão, das mais difíceis de aceder.

O teste consiste em arrefecer até determinada temperatura a suspensão no ponto de zero deslocamento, ou seja, a 4 mm do limite superior do deslocamento da suspensão (contato entre o SC e o ÍP), e proceder à excitação de uma vibração. Noutras testes, após o arrefecimento, o ÍP será deslocado 3,5 mm, de modo a testar a resposta da suspensão no ponto mais distante do deslocamento nulo, em que seja seguro operar.

Idealmente proceder-se-ia a uma transição SC-condutor e uma condutor-SC antes de se testar outra frequência, contudo, devido ao número de combinações de temperaturas e frequências este processo demonstrar-se-ia impraticável, assim, as várias frequências foram testadas sem ciclo térmico, contudo, ouve um ciclo térmico para as diferentes temperaturas e posições de teste.

5.2.1 Modelo e resultados espectados

Como foi descrito no terceiro capítulo, optámos por fixar o SC e fazer oscilar apenas o ÍP. O sensor de força encontra-se logo seguido ao ÍP, fazendo com que toda a força que neste se exerça seja medida. Não há, deste modo, um sistema oscilatório, já que a energia potencial formada na “mola” - ÍP, SC- não tem um recetáculo para onde se transferir periodicamente (com exceção da massa do ÍP e da *loadcell*). O modelo matemático que aplicaremos difere, assim, do modelo convencional de uma suspensão.

As variáveis consideradas são apresentadas na Figura 5.4. Y_0 corresponde ao ponto de deslocamento inicial, referente à posição de força nula. $Y(t)$ é a variável correspondente à componente variável do deslocamento.

No esquema da esquerda apresenta-se a força elástica correspondente à interação linear entre o SC e o ÍP, assim como o amortecedor virtual que completa o modelo da interação. O quadrado representa a massa do ÍP e *loadcell*.

Por baixo da *loadcell* está representada a força introduzida pelo sistema de forçamento.

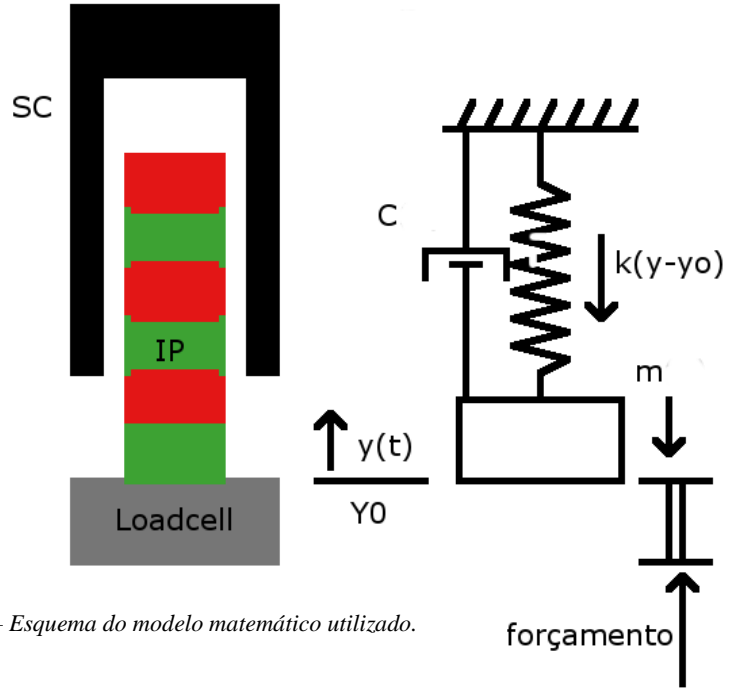


Figura 5.4 – Esquema do modelo matemático utilizado.

A dinâmica do sistema é então formulada pela seguinte equação:

$$forçamento = K * (y - y_0) + m * (\ddot{y}) + C * (\dot{y}) \quad |(4.2.1)$$

Se tomarmos:

$$forçamento = \mathbf{F}e^{i\omega t} + P \quad |(4.2.2)$$

Sendo a notação complexa novamente empregue, e estando a negrito as constantes complexas. O P corresponde à componente constante da força.

Então, pelo método dos coeficientes indeterminados variáveis, tomaremos como solução particular:

$$y(t) = \mathbf{y}e^{i\omega t} \quad |(4.2.3)$$

Equacionando (4.2.1), (4.2.2) e (4.2.3), temos:

$$\mathbf{F}e^{i\omega t} + P \equiv K * (\mathbf{y}e^{i\omega t} - y_0) + m * (\mathbf{y}\ddot{e}^{i\omega t}) + C * (\mathbf{y}\dot{e}^{i\omega t}) \quad |(4.2.4)$$

Onde o símbolo de coincidência é utilizado para significar que a equação se verifica para todos os instantes de tempo e não apenas num ponto em particular.

Assim, temos, por uma questão de independência linear entre as componentes temporais:

$$P = -K * Y_0 \quad |(4.2.5)$$

e

$$\mathbf{F} = K\mathbf{y} - \omega^2 * m * \mathbf{y} + i\omega C\mathbf{y} \quad |(4.2.6)$$

Se notarmos, esta equação corresponde a um oscilador harmónico unidimensional amortecido com:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}}, C_c = 2\sqrt{K * m} \quad |(4.2.7)$$

Aonde a massa é a do ÍP mais a *loadcell*. (difere do modelo do sistema de suspensão na massa)

A força medida na *loadcell* será então a correspondente a uma suspensão de massa ÍP+*loadcell*, pelo que os outros parâmetros poderão ser retirados do gráfico Y/F.

Um problema surge de imediato. Acontece que no que toca à medição experimental tanto os sistemas têm um nível elevado de ruído, como a própria forma do seno pode não ser perfeita (atritos, incapacidades do sistema de controlo).

Deste modo foi necessário recorrer a um método que nos extraísse dos dados medidos aqueles que são referentes apenas à frequência de interesse, é este método, a decomposição em série de Fourier. No caso, a função não é contínua, pelo que trata de uma série de Fourier discreta, SFD.

5.2.2 Cálculo da SFD pela FFT

A SFD corresponde à representação de uma sucessão de valores através dos coeficientes de projeção sobre uma base do espaço das sucessões com o número de elementos da sucessão a representar. Essa base é composta das funções periódicas linearmente independentes nesse domínio, são elas as funções sinusoidais de semi-período submúltiplo do domínio da sucessão a representar. Os coeficientes da SFD para cada uma dessas frequências são assim calculados pelo produto interno entre a sucessão de valores e a sucessão sinusoidal da frequência correspondente, sendo esta normalizada à unidade.

Esta série permite deduzir diretamente qual a amplitude da componente sinusoidal do sinal para cada uma das frequências da série. Esta análise tem bastante mérito para as sucessões que apresentam periodicidade, como será o caso da nossa excitação e, portanto, dos nossos sinais medidos.

A SFD foi calculada por um método expedito chamado de FFT, *fast Fourier transform*. Nos tempos que correm praticamente todos os microprocessadores têm capacidades de cálculo da FFT eletronicamente, quer para cálculos de som quer para cálculos de imagem, entre outros, e, portanto, o cálculo da mesma é quase instantâneo mesmo que se calcule para séries de dezenas de milhar de pontos.

O método da FFT utiliza a subdivisão do grupo de pontos a transformar em grupos mais pequenos e a posterior combinação das várias transformadas de cada subgrupo em uma só. O processo permite passar o cálculo da SFD de $O(N^2)$ para $O(N\log(N))$, constituindo uma grande diminuição na extensão dos cálculos, em especial para séries de dimensão elevada.

A resolução, em frequência, da FFT é o inverso do intervalo de tempo da amostra. Na maioria das nossas medições isso corresponde a $1/3 = 0,33$ Hz. Para melhorar esta resolução o único método é

aumentar o período de medição, como fizemos em algumas das amostras para frequências pequenas (onde a resolução em frequência tem uma dimensão relativa muito superior).

Aumentar o período de medição tem o incómodo de aumentar a quantidade de dados medidos, e a processar. Portanto, no nosso sistema, quando aumentámos o período de medição de um teste a taxa de amostragem decresce em concordância de modo a garantir o mesmo número de pontos. Assim introduzimos o segundo parâmetro de importância numa FFT, a taxa de amostragem da amostra original. A taxa de amostragem indica qual o dobro da frequência máxima da FFT. No nosso sistema, tendo taxas de amostragem de até 50kHz, a frequência máxima representada é de 25kHz, muito acima do limite necessário, deixando margem para alguma filtragem de ruído no pós-processamento.

Os dados medidos apresentaram uma questão com que não estávamos acostumados a lidar, o período entre cada ponto da medição não era perfeitamente/matematicamente certo, como é requerido para se considerar uma série matemática. Como solução testámos dois métodos:

- A utilização de um método matemático derivado da FFT que permite o cálculo da mesma para amostragens não equiespaçadas temporalmente. Esta foi implementada por uma função de Labviewtm e demonstrou ser demasiado morosa para o cálculo de amostras tão grandes.
- O método que propus consiste em dividir o tempo da amostra em um número de intervalos iguais, cuja dimensão permita haver sempre pelo menos um ponto no seu interior e de seguida fazer uma média aritmética dos valores medidos para os pontos no interior de cada intervalo. A FFT foi posteriormente calculada para estes intervalos equidistantes.

O facto do tamanho máximo de cada intervalo residir nas dezenas de microssegundos faz com que qualquer efeito deste “*binning*” não afete uma frequência tão baixa como é a de 1 KHz a que pretendemos fazer medições.

Não obstante, os dois métodos foram comparados e os resultados foram satisfatórios, havendo diferenças relativamente pequenas entre os dois.

A presença de picos em frequências múltiplas da frequência do sinal indica uma forma não perfeitamente sinusoidal, já que correspondem a sinais que se repem com a mesma cadência do sinal medido, mas que realçam variações repetidas no mesmo. Tirando os sinais medidos para forças perto dos 55Hz, os picos de frequências múltiplas do sinal apresentam uma dimensão relativamente diminuta (tipicamente abaixo de um quinto do pico central).

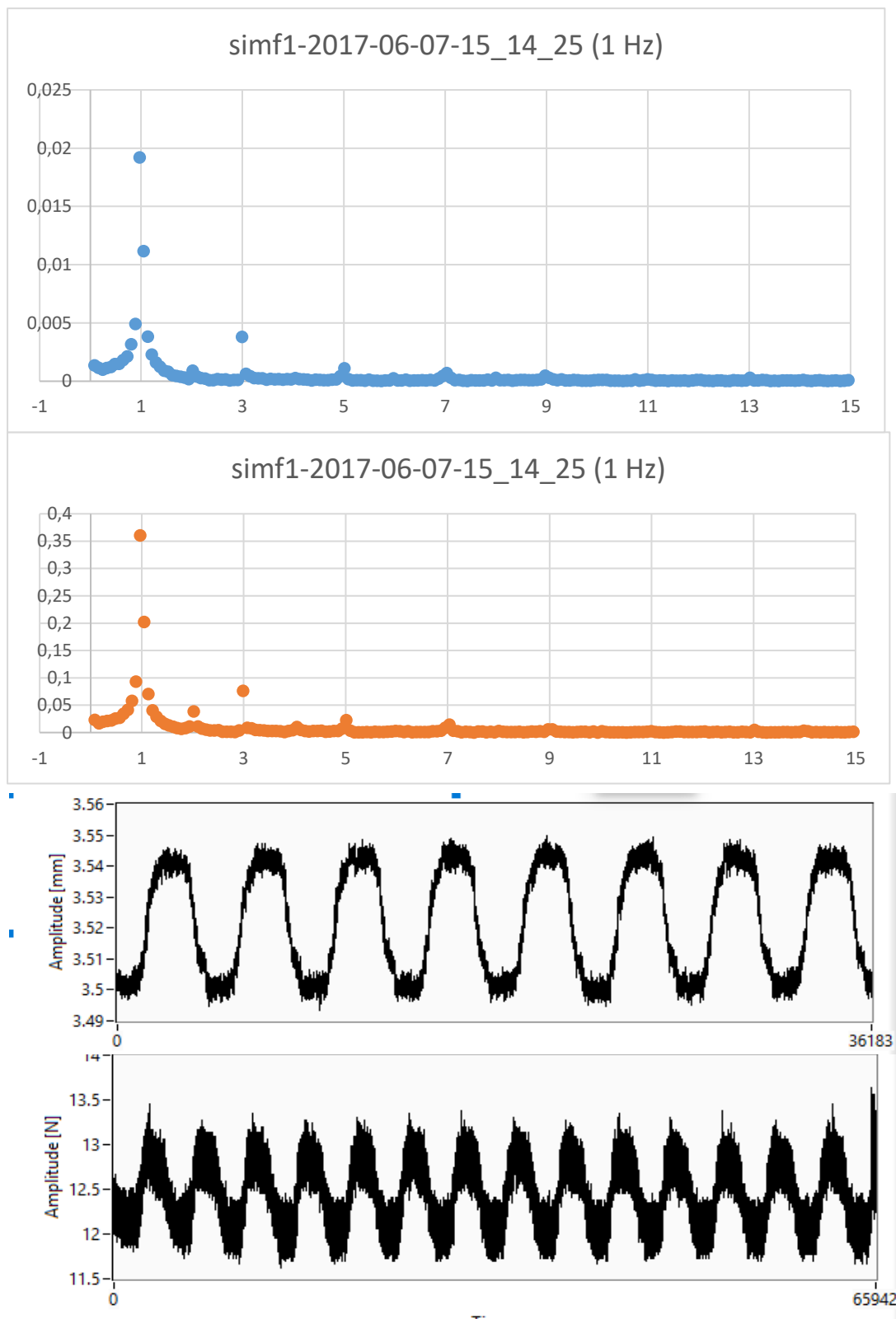


Figura 5.5 – gráficos dos valores medidos para 1 Hz, num dos testes dinâmicos. visualmente podemos confirmar que a FFT para a frequência pretendida apresenta uma amplitude que está de acordo com a do sinal medido.

5.2.3 Valores medidos e cálculos

De seguida irei apresentar um resumo dos dados obtidos nos testes de 30 K para deslocamento nulo e a 18K para deslocamento médio de 3,5mm, o limite de operação da suspensão.

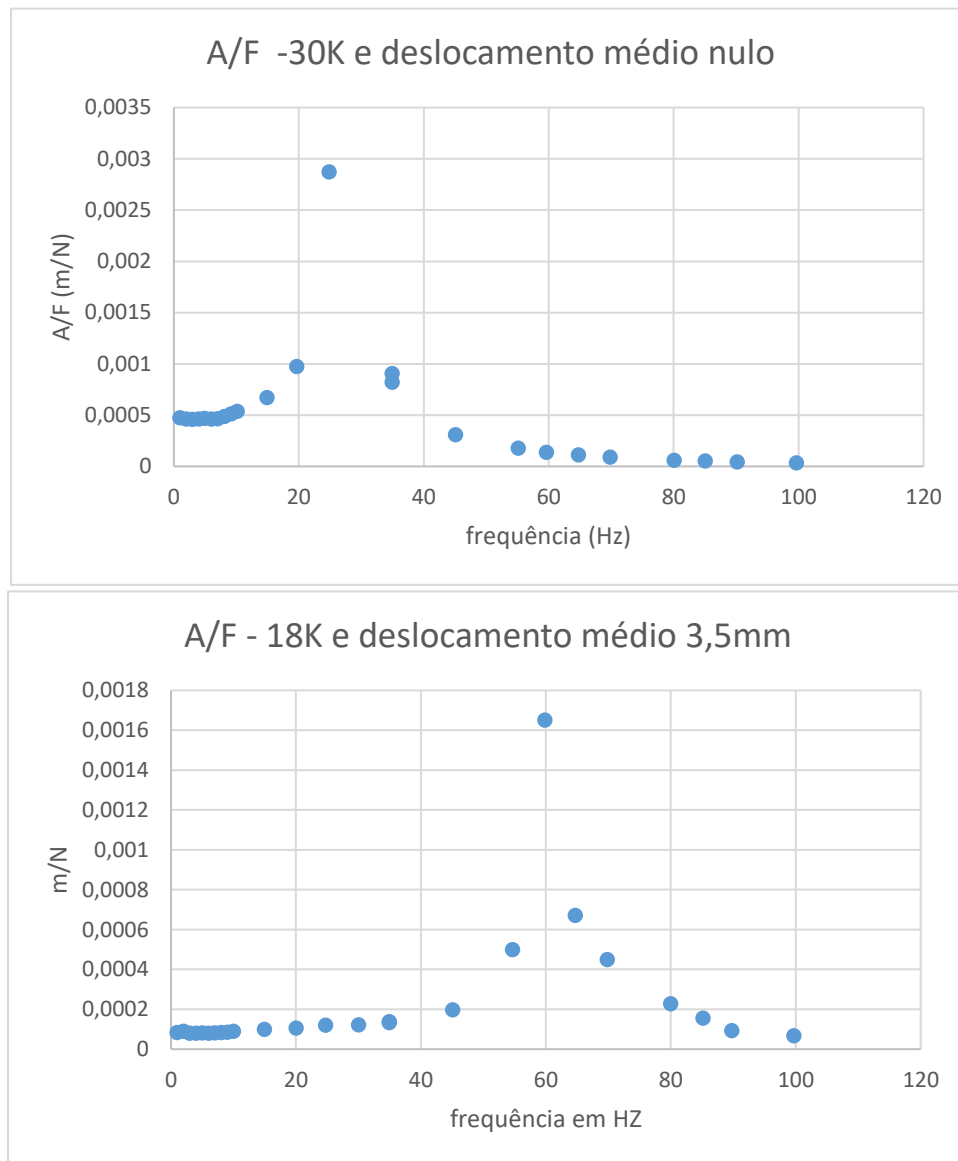


Figura 5.6 – gráficos da relação entre a amplitude de oscilação e amplitude da força para diferentes frequências.

Ambos os gráficos apresentam uma forma muito parecida com os gráficos de amplitude vs força de um sistema oscilatório, como previsto.

Para frequências muito baixas, a amplitude é aproximadamente a proporção entre a força e a constante elástica. Deste modo o primeiro gráfico sugere uma rigidez de 2114N/m a 30K e o segundo uma rigidez de 12150 N/m a 18K. O segundo valor apresentado não se apresenta em concordância com os resultados dos testes estáticos, contudo, demonstra ser um valor coerente ao longo dos testes dinâmicos.

De acordo com estes valores de rigidez a massa necessária para que fossem as frequências naturais as frequências de pico seriam, 81g para os valores a 18K e 85g, para os valores medidos a 30K. Estes

valores mostram alguma repetibilidade na resposta do sistema e estão certamente perto do valor de 70g do conjunto ÍP e *loadcell*, infelizmente apenas o íman permanente foi pesado (7,2g). Por sorte, temos uma *loadcell* igual que não está a ser utilizada pelo que podemos pesá-la para estimar a massa da utilizada (63g). Não conseguimos, no entanto, estimar o peso das porcas e outros pequenos objetos que possam ter sido utilizados, por outro lado, apenas a parte da massa da *loadcell* que se encontra solidária com o ÍP corresponde a massa inercial, pelo que o valor exato é difícil de avaliar.

Contudo, a soma, que se estima pouco acima das 70g, não difere muito dos valores calculados, e estes pressupunham um amortecimento nulo, que, como podemos ver, não se verificou.

Para poder estimar o amortecimento podemos recorrer a dois métodos:

- Calcular a frequência natural através da massa que estimamos e o coeficiente de rigidez. Equacionar esta frequência com a frequência de pico do gráfico (afeta de amortecimento) e obter o resultado.
- Simular uma curva com a rigidez associada aos pontos de menor frequência e ajustar recursivamente a massa e o amortecimento até que as curvas se igualem.

Pelo primeiro método obtemos um fator de amortecimento de 0,402 aos 30K e de 0,441 aos 18K, como podemos verificar pela comparação da Figura 5.7 estes valores não são compatíveis com os valores medidos

Os valores medidos foram normalizados à constante elástica, dedutível pelo nível medido à frequência de 1 Hz.

O valor calculado foi normalizado apenas pelo quadrado da frequência natural.

Como podemos observar, o fator de amortecimento que teoricamente iguala a frequência de pico à frequência natural estimada afetada pelo amortecimento, impõe uma altura pico claramente inferior, pelo que este método não se prova útil na estimação do fator de amortecimento.

Os resultados obtidos pelo segundo método mostram-se muito mais atrativos, como se pode ver na Figura 5.8 .

Neste segundo método, foi garantido que a frequência de pico do modelo corresponderia à frequência de pico medida. O amortecimento foi depois aproximado para que a amplitude a estas frequências se igualasse. O resultado mostrado foi para um fator de amortecimento de 0,025 para os 18K e 0,082 para os 30K

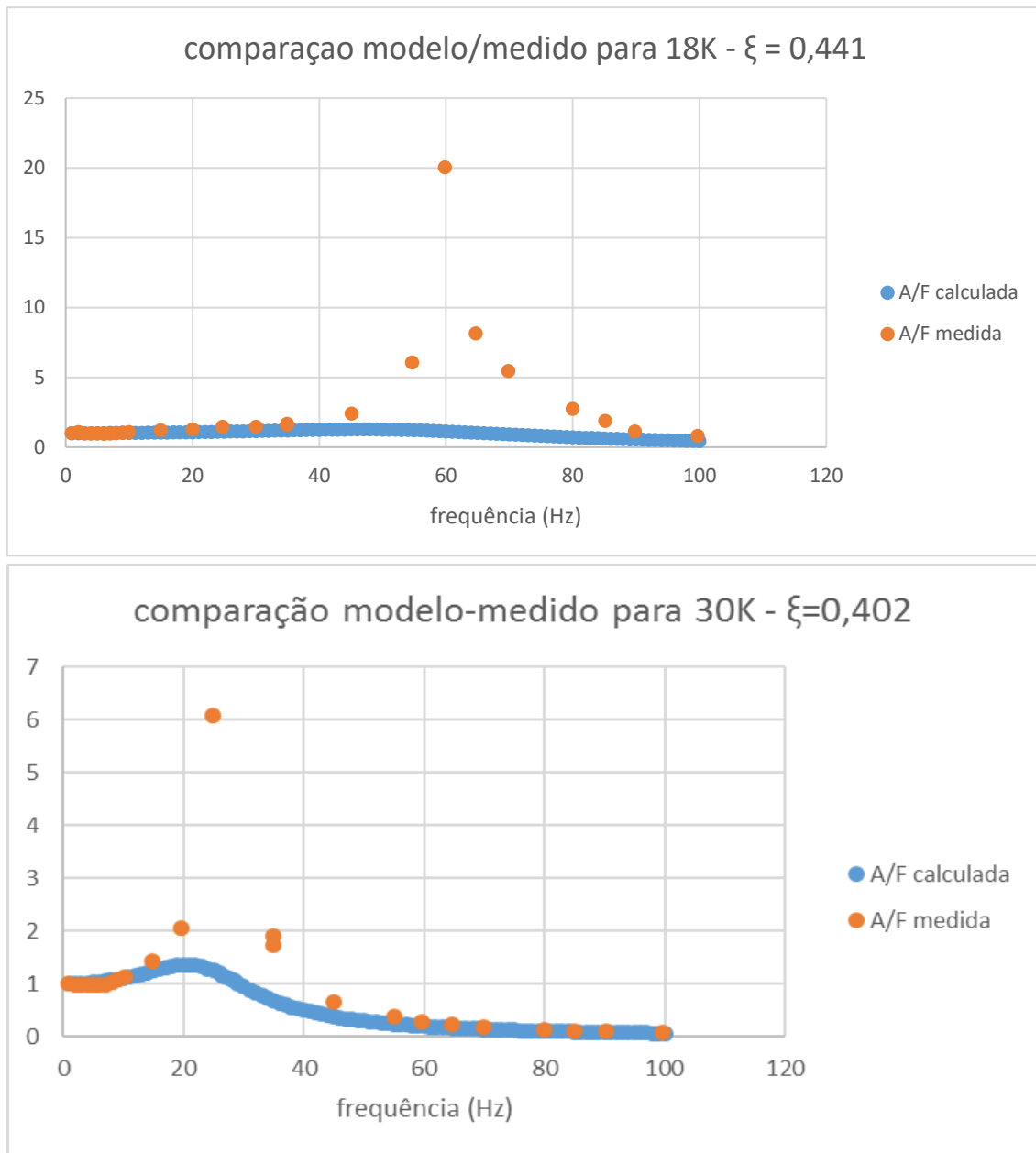


Figura 5.7 – gráficos de comparação entre os valores medidos e os valores calculados através da massa e coeficiente de rigidez

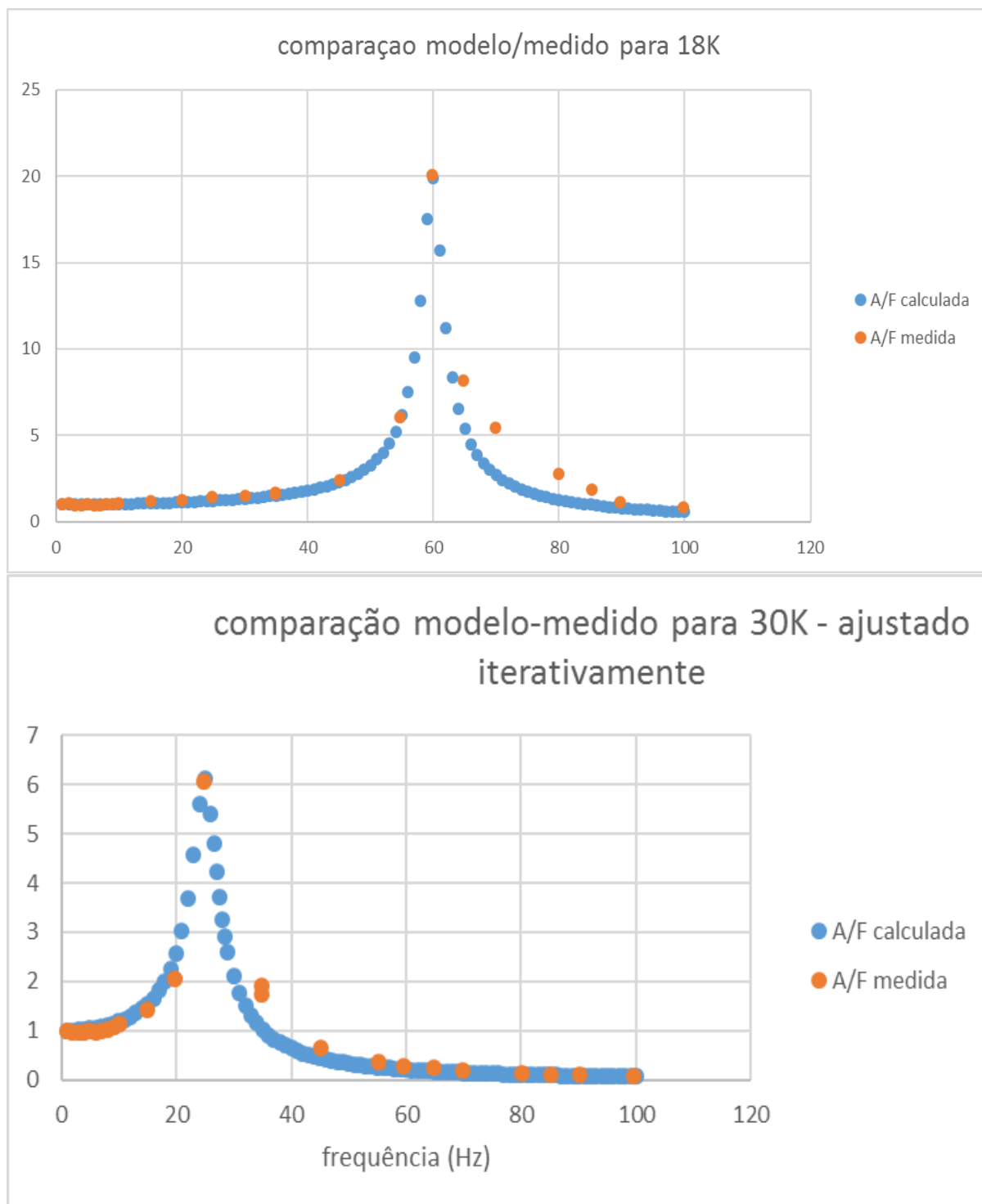


Figura 5.8 – comparação entre os valores medidos e resultantes do modelo do oscilador harmônico, tendo como base a frequência de pico e a amplitude a esta frequência.

5.2.4 Fontes de erro e incerteza

Em toda a experiência foi evidente a grande influência que o ruído dos sinais medidos teve. Este ruído limitou não só a praticabilidade das análises como dificultou bastante a operação do sistema de forçamento para baixas amplitudes, função essa que poderia se ter revelado importante. Este ruído veio não só do ambiente de ruído eletromagnético, mas também da dificuldade na implementação de uma referência de tensão comum.

Uma fonte de erros e incertezas bastante significativa, que se relaciona com a anterior, advém da incapacidade do sistema de controlo de impor um movimento oscilatório perfeitamente sinusoidal. O mau dimensionamento dos sensores e atuadores, assim como o algoritmo de controlo, contribuíram para o mau desempenho do sistema.

Uma das questões que resultou em uma incerteza maior nos resultados e informações extraídas foi a resolução em frequência dos dados medidos. O efeito desta revela-se na dificuldade em verificar a validade do modelo empregue, como se pode ver pela Figura 5.9. Nesta, um modelo com determinados parâmetros é utilizado, e um gráfico com a resolução em frequência medida é produzido. A comparação entre os dois gráficos que representam o mesmo modelo permite chegar à conclusão de que muita informação é perdida pela falta de resolução.

Esta resolução seria melhorada através da aquisição de sinais mais longos, a qual possivelmente requeria a utilização de um sistema de aquisição com menos taxa de amostragem, uma repetibilidade temporal melhor, diminuindo o número de dados, mas mantendo um nível baixo de incerteza temporal.

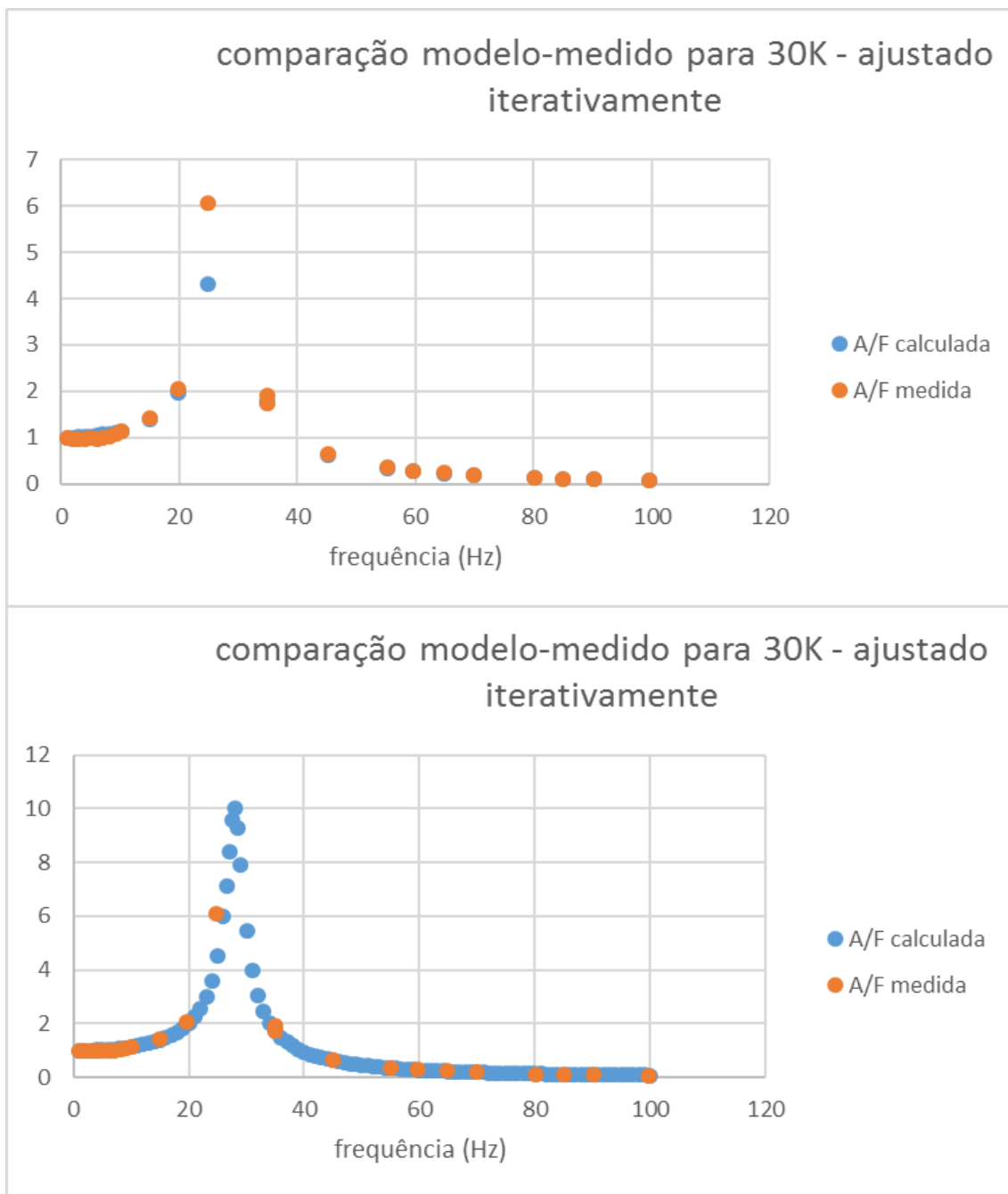


Figura 5.9 – comparação entre um gráfico em que o modelo se apresenta com uma resolução de 1 Hz e um em que o modelo é aplicado aos pontos medidos.

Diferenças relativamente pequenas no gráfico de pequena resolução impõem grandes diferenças num gráfico a maior resolução. Serve esta comparação entre os dois gráficos para demonstrar a necessidade de uma maior resolução em frequência para uma melhor modelação e extração de informação

5.3 Análise de resultados

Nos vários testes que efetuámos podemos deduzir um elevado nível de dispersão dos resultados. Ainda que as fontes de erro e incerteza descritas acima possam ter uma parte nesta realidade, é imperativo deduzir que a suspensão desenhada apresenta bastante variabilidade nas suas características. Um estudo mais exaustivo e pormenorizado vai, deste modo, ser essencial à otimização da mesma.

Depreendeu-se também da análise dos resultados que o modelo utilizado se revelou bastante capaz e que a análise espectral através da FFT de valores estatisticamente discretizados foi um sucesso.

Os valores obtidos apontam para uma constante elástica de 2114 N/m e 12150 N/m, respetivamente a 30K e a 18K, e um coeficiente de amortecimento de 0.082 e 0.025 para as mesmas temperaturas. Estes resultados enquadram o sistema final entre os 8450 N/m e os 48600N/m de constante elástica, estando o valor que obedece aos requerimentos, $< 34000\text{N/m}$, dentro deste intervalo, tal como é o caso do fator de amortecimento que se encontra abaixo dos 0.1. Assim, pode-se concluir que, após otimização, o sistema poderá funcionar como desejado.

De notar que os resultados dos testes dinâmicos já correspondem a centenas ou milhares de ciclos de força, pelo que estes resultados já compreendem o efeito da histerese transiente do primeiro ciclo.

Os resultados estáticos poderão ter sido afetados por esta histerese inicial, sendo que se as proporções entre o primeiro e os ciclos seguintes forem coerentes com os resultados obtidos em Espanha, os valores dos resultados estáticos estarão corretos com os resultados dos testes dinâmicos. Mais se acrescenta que, sendo o sistema final composto de pares de braços de suspensões em direções opostas, o efeito desta histerese ira causar a diminuição da rigidez para o primeiro ciclo, mas não causará o deslocamento do objeto suspenso (os lados opostos compensam-se).

Com base nos resultados obtidos, proponho ainda a possibilidade de se utilizar a temperatura de operação do sistema para o adaptar à utilização diferenciada à superfície da terra e no espaço.

6 Conclusões

Este projeto proporcionou-me um ambiente único para a minha adaptação ao meio de desenvolvimento em engenharia. Apenas com um projeto destas proporções me foi possível ter acesso às experiências relacionadas com o trabalho em equipa, e próprio, de longo prazo. A extensão das dificuldades que foram ultrapassadas, a confiança necessária na equipa e até a noção do tempo necessário para efetuar cada tarefa forma, para mim, algo diferente e de qual retirei bastante. Trabalhar sobre o stress de limites em tempo e dinheiro, mas também das dificuldades da burocracia e dependência nos fornecedores, transmitiu-me toda uma realidade que até então desconhecia, constatação de enorme valor.

Marcada ficou, também, a noção qualitativa das dificuldades inerentes à aplicação de tecnologias e conceitos que se apresentam, em teoria, tão simples, e da dificuldade e tempo necessário para as superar.

O projeto, em todas as falhas que se lhe possam apontar, foi efetuado e, no geral, o sistema de vácuo, o sistema de criogenia, a estrutura da experiência completaram as suas funções. Mais difícil foi o desenvolvimento do sistema de forçamento, este apresentou dificuldades que não suspeitávamos e, por isso, tornou-se parte significativa do conhecimento assimilado. Das limitações verificadas neste sistema se pode concluir, à *posteriori*, que um plano mais detalhado deste sistema, incluindo uma simulação detalhada tanto da mecânica e dinâmica, como da eletrónica, teria sido proveitoso, ainda que os constrangimentos sofridos na altura não o tivessem facilitado.

No decorrer do meu estágio tive a oportunidade de desenhar enumeras peças e simular o seu comportamento mecânico e térmico.

Desenvolvi programas de LABVIEW™ para o emprego da placa de aquisição da NI, de Arduino (na nossa tentativa frustrada de empregar), e contribuí para o *debug* e conceção do programa em C a operar no BeagleBone. Em paralelo tive de produzir alguns circuitos eletrónicos de adaptação de sinal para a intercomunicação do sistema de controlo, os CAD e os sensores (eletrónicos).

No âmbito das minhas funções acabei por conceber um sistema de forçamento com controlo, utilizando um atuador eletromagnético controlado por PWM, um sensor de posição, e eletrónica de controlo. Os resultados não foram ótimos, mas ainda assim empolgantes e, em minha opinião, meritórios.

Concebi ainda um sensor tridimensional sem contacto, a operar em vácuo e baixas temperatura, utilizando apenas prismas, um feixe laser e três sensores PSD. Ainda que não tivesse sido concluída a produção do mesmo, tornou-se também um objeto de grande orgulho.

Assim sendo, e graças à orientação dissimuladamente eficaz do Doutor Paulo Gordo, foi-me possível participar ativamente em todas as discussões técnicas e científicas do projeto e formar competências valiosas nas áreas dos conhecimentos associadas ao meu labor.

7 Referências

‘Athena’ (no date). European Space Agency. Available at: <http://sci.esa.int/cosmic-vision/54517-athena/> (Accessed: 20 September 2017).

Bank, G., Virginia, W. and Behrens, G. (1997) ‘Guidelines for the Design of Cryogenic Systems’, *National Radio Astronomy Observatory*, (306).

Bardeen, J., Cooper, L. N. and Schrieffer, J. R. (1955) ‘LETTERS TO THE EDITOR Microscopic Theory of Superconductivity~’, *Bogolyubov J.Phys. (U.S.S.R.) II*, 100(23). Available at: <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.106.162> (Accessed: 17 September 2017).

Ekin, J. W. (no date) Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements, Materials Characterization.

esa (2014) ‘Statement of work : Cryogenic Vibration Isolators and thermal disconnects’, (1), pp. 1–29.

Fujita, T. and Idesawa, M. (no date) ‘New types of position sensitive device for accurate sensing’, in *Proceedings 1999 International Conference on Information Intelligence and Systems (Cat. No.PR00446)*. IEEE Comput. Soc, pp. 141–148. doi: 10.1109/ICIIS.1999.810239.

Gifford, W. B. (1965) ‘The Gifford-McMahon Cycle’, *Cryogenic Engineering Conference, Rice University, Houston, Texas*. doi: 10.1007/978-1-4757-0522-5.

Han, H.-S. and Kim, D.-S. (no date) Magnetic levitation : maglev technology and applications.

I. Valiente, E. D. and P. G. (2015) *Levisolator - Full Proposal*.

Marquardt, E. D., Le, J. P. and Radebaugh, R. (no date) ‘Cryogenic Material Properties Database Cryogenic Material Properties Database’. Available at: http://cryogenics.nist.gov/Papers/Cryo_Materials.pdf (Accessed: 20 September 2017).

MIT Experimental Cosmology and Astrophysics Laboratory (no date). Available at: http://web.mit.edu/figueroagroup/ucal/ucal_tes/ (Accessed: 20 September 2017).

Moon, F. C. and Chang, P.-Z. (1994) Superconducting levitation : applications to bearings and magnetic transportation. Wiley.

‘No Title’ (2017) *Wikipedia*.

Schweitzer, G. (Gerhard) and Maslen, E. H. (2009) Magnetic bearings : theory, design, and application to rotating machinery. Springer.

Tseng, Y. S., Chiang, C. H. and Chan, W. C. (2004) ‘Levitation force relaxation in YBCO superconductors’, *Physica C: Superconductivity and its Applications*. North-Holland, 411(1–2), pp. 32–34. doi: 10.1016/j.physc.2004.06.001.

8 Anexos

A. Características de materiais para baixas temperaturas

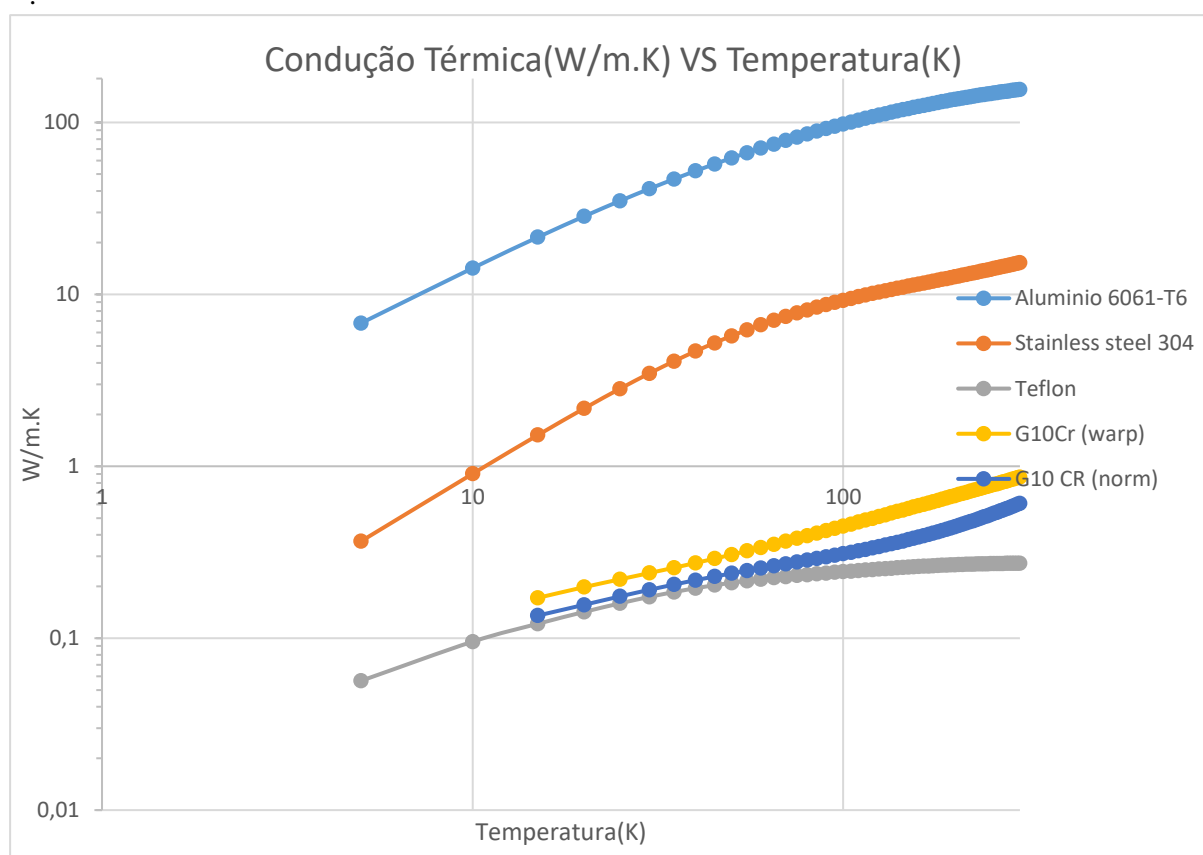
De seguida serão apresentados os valores da condução térmica e expansão térmica linear integrada para alguns materiais. Estes valores foram calculados utilizando as fórmulas e coeficientes retirados de uma publicação do NIST, intitulada Cryogenic Material Properties Database.

Estes dados foram necessários para simular a estrutura nas condições de funcionamento.

A expansão térmica linear integrada é a relação, em proporção, entre a dimensão do objeto a dada temperatura e a mesma a uma temperatura estipulada, nos valores apresentados 293K.

O SOLIDWORKS, programa utilizado para as simulações, não importa valores da expansão térmica linear integrada. Por isso, foi necessário implementar a derivada (entre outras manipulações matemáticas) desta função para obter o valor do coeficiente de expansão térmica, apresentado na Figura 8.3.

Dos materiais apresentados não consta a fibra de vidro utilizada no desenho da estrutura, ISOVALTm, contudo esta foi avaliada a partir da fibra de vidro G10. Para tal, os valores fornecidos pelo produtor foram comparados com os do G10, e uma relação linear entre os valores das duas foi aproximada.



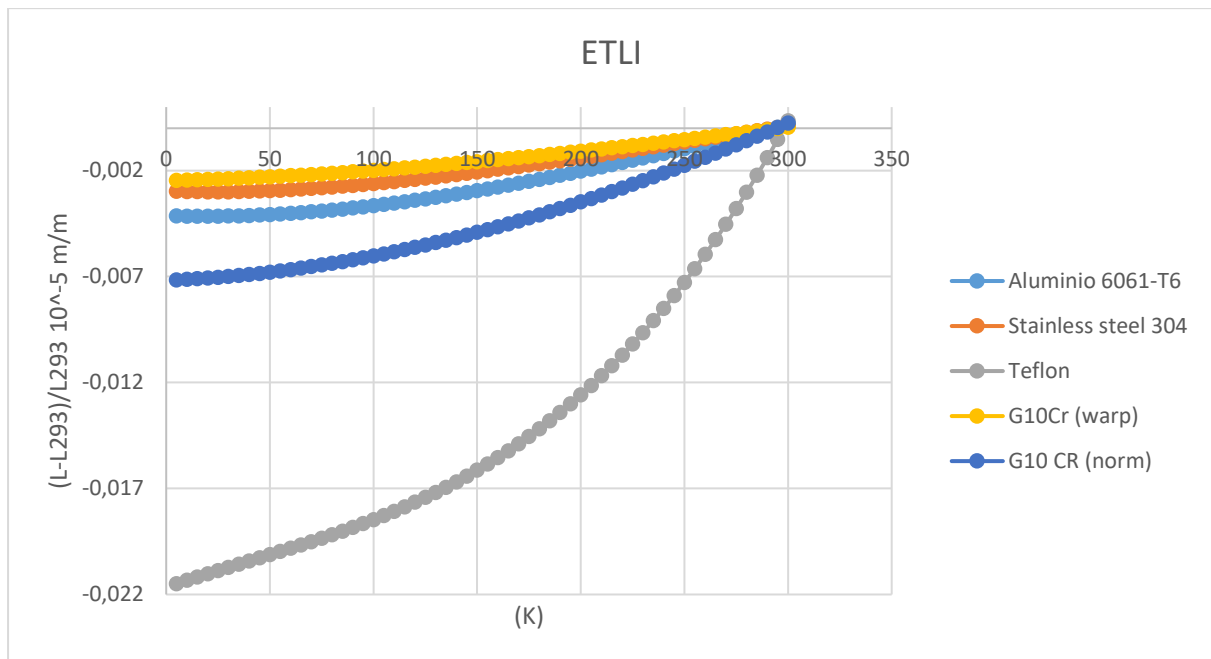


Figura 8.1 e 8.2 - Gráficos obtidos da implementação em Excel dos coeficientes provenientes do estudo do NIST para características de materiais a baixas temperaturas.

Em primeiro lugar apresenta-se a condução térmica em função da temperatura para os materiais avaliados.

Em segundo, apresentam-se os valores da expansão térmica linear integrada.

Em ambos os gráficos o eixo das abcissas é logarítmico.

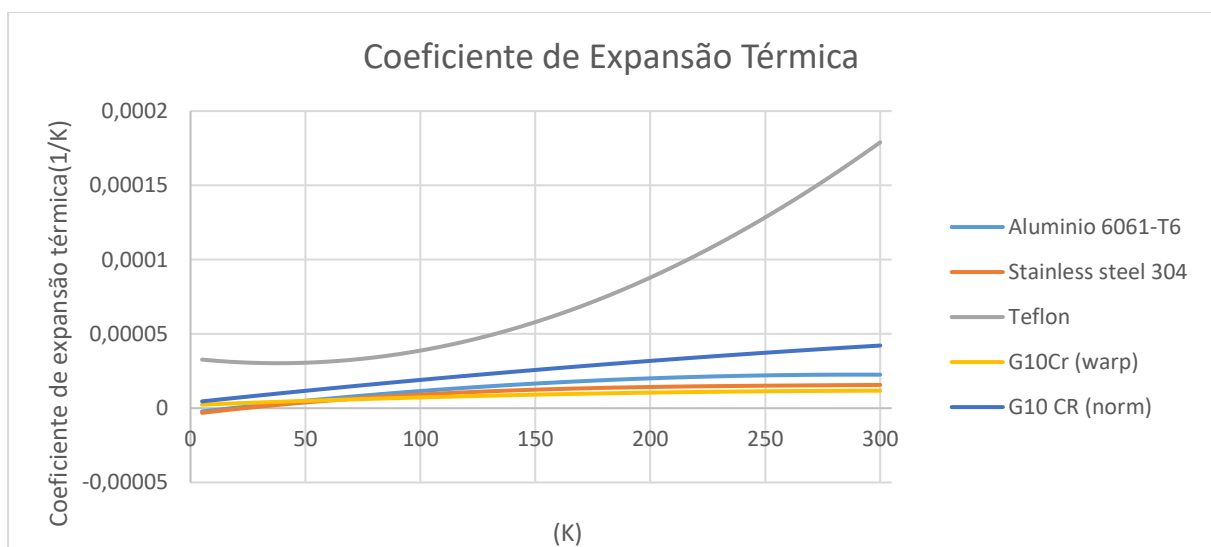
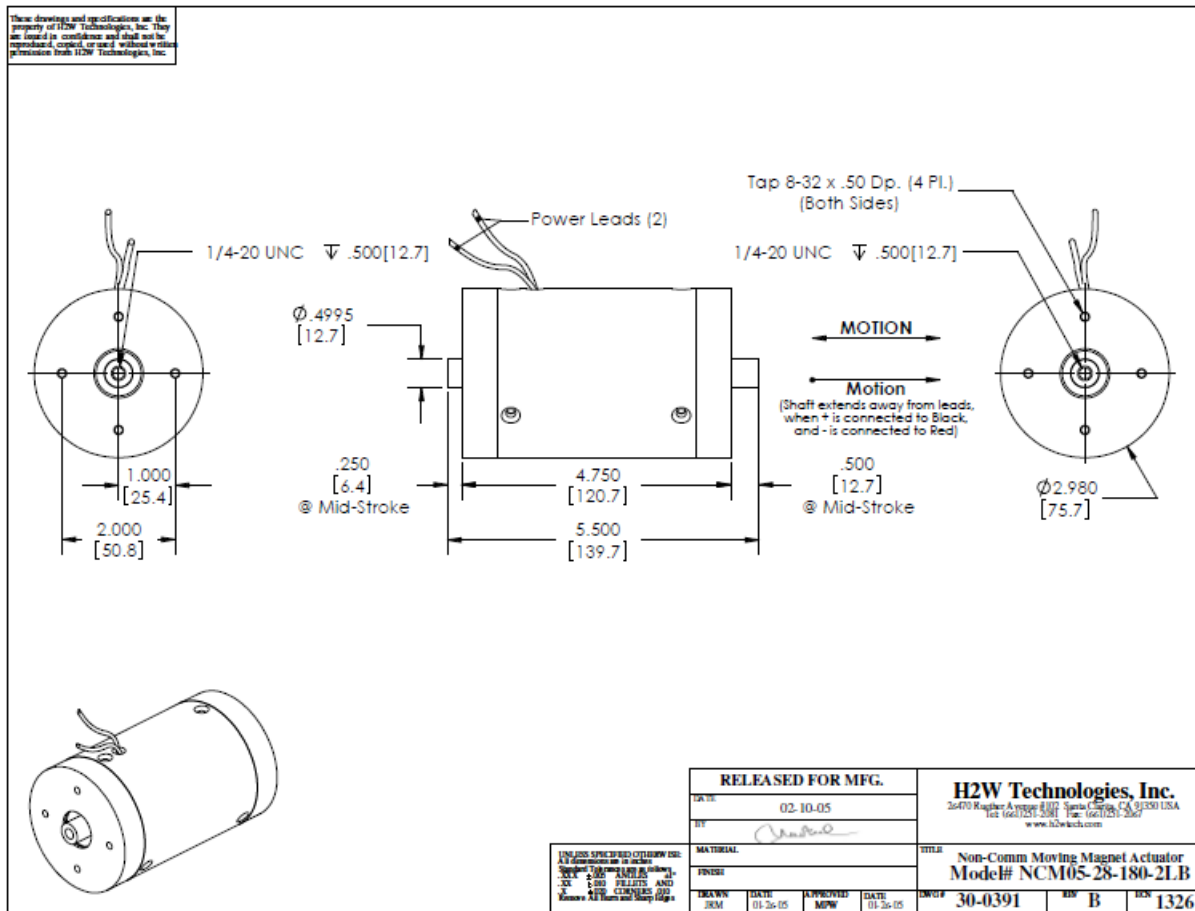


Figura 8.3- Curvas para o coeficiente de expansão térmica a baixas temperaturas. Curvas para o .coeficiente de expansão térmica a baixas temperaturas.

B. Datasheets de alguns dos instrumentos utilizados

Voice-coil actuator:



MOVING MAGNET NON-COMM ACTUATOR SPECIFICATIONS		
Motor P/N	NCM05-28-180-2LB	
Stroke	0.50"	12.7 mm
Radial Clearance	N/A in	N/A mm
Bearing Type	Linear Bushings	
Moving Mass	1.56 lbs	706 grams
Total Mass	5.38 lbs	2442 grams
Resistance @ 20C	10.2 ohms	
Inductance @ 20C	5.1 mH	
Electrical Time Constant	0.50 msec	
Motor Constant	2.71 LBS/SQRT(Watt)	12.1 N/SQRT(Watt)
Force Constant	8.7 LBS/Amp	38.6 N/Amp
Back EMF	1.0 V/ips	38.6 V/m/sec
Continuous Force	18 LBS	80 N
Max Power @ 100% Duty	44 Watts	
Peak Force	54 LBS	240 N
Max Power @ 10% Duty	397 Watts	

...